



Etude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostic du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée

Fouzi Nabet

► To cite this version:

Fouzi Nabet. Etude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostic du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée. Géographie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2013. Français. NNT : 2013PA010611 . tel-01001675

HAL Id: tel-01001675

<https://theses.hal.science/tel-01001675>

Submitted on 4 Jun 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS I PANTHEON SORBONNE

THESE

**Pour obtenir le grade
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS I**

Discipline : Géographie et Aménagement

Réalisé Par

Nabet Fouzi

Etude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostic du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée



**Directeurs de thèse : PR Emmanuèle GAUTIER et PR Charles LE COEUR
Laboratoire de Géographie physique CNRS UMR 8591 Université Paris I**

COMPOSITION DU JURY :

G. Arnaud-Fassetta	Professeur des Universités, Université Paris XII	(Rapporteur)
S. Braud	Ingénieur, DIREN-Centre	(Invité)
N. Carcaud	Professeur des Universités, Université d'Angers	(Rapporteur)
E. Costard-Gautier	Professeur des Universités, Université Paris VIII	(Co-directrice)
C. Le Cœur	Professeur des Universités, Université Sorbonne Paris I	(Directeur)
H. Piégay	Directeur de Recherche, CNRS UMR 5600	(Examineur)

REMERCIEMENTS

A l'issue de ce travail de thèse, je tiens à remercier en premier lieu mes directeurs Mme Costard-Gautier, Professeur des Universités (Université Paris VIII) et M. C. Le Cœur Professeur des Universités (Université Paris I Sorbonne) pour leur confiance, exigence et par-dessus tout leur sympathie. Ces années ont été extrêmement enrichissantes à leurs côtés tant du point de vue scientifique, pédagogique qu'humain.

Je tiens à remercier très vivement les membres du jury de cette thèse qui ont accepté d'évaluer mon travail : M. S. Braud, Ingénieur (DIREN-Centre) ; Mme N. Carcaud, Professeur des Universités (Université d'Angers) ; G. Arnaud-Fassetta, Professeur des Universités, Université Paris XII ; et M. H. Piégay, Directeur de Recherche (CNRS UMR 5600).

J'adresse ma plus sincère gratitude aux organismes qui ont constitué les cadres scientifiques, financiers et matériels de cette thèse :

- Ministère de la Recherche
- Ministère de l'Education Nationale
- Université Paris VIII et Ecole Doctorale ED 401
- LADYSS (Laboratoire Dynamiques Sociales et Recomposition des Espaces ; CNRS UMR 7533) et Mme F. Plet.
- Laboratoire de Géographie Physique à Meudon (CNRS et Université Paris 1, UMR 8591), sous la direction de M. C. Le Cœur.
- Equipe de la Zone Atelier Loire : Mme J. Burnouf (Pr. Paris 1), M. Garcin (BRGM) et Mme N. Carcaud.

Merci à M. A Bué (M.C.) pour m'avoir guidé et aidé amicalement dans mon tout jeune parcours d'enseignant, à M. O. Archambeau, M.C. et Dir du Département de Géographie (Université Paris VIII) et les Expéditions Géographiques Françaises pour le développement de la créativité, à M. V. Godard (M.C.) pour ses conseils, son soutien et sa participation à l'analyse de données, et à tous mes collègues du département de Géographie.

Merci aux différents services techniques du LGP et à leurs représentants qui m'ont beaucoup apporté durant ces années aussi bien sur le terrain qu'au laboratoire : Ana Andrieu (I.R.), Daniel Brunstein (I.E.), Franck Goupille (T.), Delphine Grancher (A.I.) et Stéphane Kunesch (A.I.). J'adresse mes plus fidèles remerciements à tous les membres du LGP.

Merci mille fois à tous les doctorants et docteurs pour leur sympathie, conseils et aides respectives : Luc Barruel, Sonia Bensadoune, Cyril Castanet, Sylvestre Da Silva, Philippe Gajevski, Coral Garcia, Claire Lang, Lydie Martinhac, Damase Mouralis, stephane Grivel, Morganne Tatibouët, Saïda Teman.

Une thèse est l'occasion privilégiée de rencontrer des personnes exceptionnelles tant au niveau de leur compétence professionnelle que de leur qualité humaine. A ce titre, j'adresse mes plus gracieux remerciements et hommages aux personnes et organismes suivants qui ont tous apporté des éléments à ce volumineux manuscrit (par ordre alphabétique) :

Agence de l'eau Loire-Bretagne, Archives départementales de la Nièvre, Archives départementales du Cher, M Billacois, Bureau de recherche Géologique et Minière (B.R.G.M), M. F. Chambaud, les Conservatoires d'Espaces Naturels des régions Centre et

Bourgogne, Division Départementale de l'Équipement (D.D.E) de Briare, DDE – Satur (M. Dubois, pilote émérite de la Loire), Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) Bourgogne, DIREN Centre (Mme Borg, M. Braud, M. Miché, M.Reinbold, Mme Sacco, M. Tur), EDF de Belleville (M.Perrichon), Equipe Pluridisciplinaire du Plan Loire (M. J.N Gautier et M. L.Maman), Espaces Naturels de France (Programme Loire Nature), Fédération archéologique du Loiret, LPO Auvergne, M Gazovski (Etudes ligériennes), Mme Garniche (Musée de la Charité-sur-Loire), Mlle P. Heuze, Musée de la Marine de Loire (Châteauneuf-sur-Loire), Maison des Sciences de l'Homme – Paris-Nord (Mme Duval et son équipe), Pavillon du milieu de Loire (M. Guntz et son équipe), Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire (M. N. Pointecouteau et M. Y. Rivière), M. Villar (INRA)...

Je tiens à remercier les riverains de la Loire et les habitants de la plaine d'inondation qui m'ont ouvert leur porte, toujours montré leur sympathie et apporté une aide précieuse (comme accéder en tracteur à des zones isolées par l'inondation !). Merci aux mairies de la Chapelle-Montlinard, Couargues, Herry, Saint-Satur, La Charité-sur-Loire, Mesves-sur-Loire, Pouilly-sur-Loire, Tracy-sur-Loire de m'avoir apporté des archives essentielles. Un grand merci au « Bon accueil » qui n'a pas besoin de changer de nom.

Merci à tous mes amis, certains ont déjà été cité, à mes collègues de travail de l'Université Paris VIII et du Lycée Merkaz Hatorah, aux étudiants de géographie (ceux qui m'ont accompagné sur le terrain, ceux qui ont travaillé avec M. V. Godard pour l'analyse de données, et ceux qui ont suivi mes cours de Licence et de Master) et à mes élèves collégiens et lycéens.

Un merci spécial à mes éternels « potes géographes », Sébastien Vignola (Professeur d'Histoire -Géographie) et Emmanuel Frison (DDE-Rennes), qui ont eu le courage de m'accompagner sur le terrain et ont eu le plaisir de déguster avec moi, sur les bords de Loire, les merveilleux produits viticoles et fromagers de ma région d'étude. « On est géographe ou on ne l'est pas ! »...

Il m'est impossible d'oublier de remercier fidèlement ma famille proche, qui m'ont tous soutenu et apporté réconfort dans ce parcours « féroce » de la thèse.

Titre : Etude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostic du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée

Résumé

Les gestionnaires de l'Etat français sont aujourd'hui exposés à plus d'un siècle de profondes modifications environnementales des cours d'eau : perturbations des conditions d'écoulement par chenalisation et incision du lit, aggravation des risques hydrologiques par rétention sédimentaire et végétalisation des corridors fluviaux, augmentation de l'érosion de la biodiversité par diminution des zones humides, enjeux des ressources en eau des plaines alluviales. La Loire fait l'objet depuis maintenant plus de 15 ans de lourds travaux d'entretien des ouvrages (levées, épis et digues) et du lit fluvial. Parallèlement aux entretiens effectués sous la houlette des services de l'Etat, des travaux de recherche en géomorphologie fluviale. Notre travail de recherche s'inscrit dans cette perspective de recherche. Les secteurs d'études définies en concertation avec les gestionnaires du fleuve (DREAL Centre, DDT et Conservatoire du Patrimoine de la région Centre) ont fait l'objet d'une analyse fine afin de : déterminer les modalités de transfert des sédiments en fonction des débits, obtenir des éléments de compréhension du réajustement fluvial et mettre en lumière l'existence d'un dysfonctionnement, ses causes et ses conséquences. Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact du forçage anthropique sur l'évolution topographique de la bande active. Les débits solide sont perturbés par différents aménagements fluviaux dans certains n'ont plus de fonction aujourd'hui ces ouvrage provoque une rupture de la continuité sédimentaire. Cela se traduit par une poursuite de l'incision du chenal principal, un exhaussement des îles et des bras secondaires et une extension du couvert végétal. Les résultats de ce travail de recherche sont mis à la disposition des gestionnaires du fleuve pour orienter de façon plus efficace les travaux de restauration de l'espace fluvial au sein du lit mineur.

Title: Study of the adjustment of active channels in the Middle Loire, geomorphological assessment and diagnosis of the functioning of secondary channels for logical management

Abstract

Managers of the french government are now exposed to more than a century of profound environmental streams changes : disruption of flow conditions chanalisation and incision of the bed increased risks hydrological sediment retention and vegetation river corridors, increased erosion of biodiversity by reducing wetlands, water resources issues floodplains. The Loire has been over 15 years under heavy maintenance works (levees, groins and breawaters) and of the riverbed. Along with interviews conducted under the leadership of state departments, research in fluvial geomorphology. Our research is part of this research perspective. Areas of study defined concentration with the river managers (DREAL center, DDT and Conservatory Heritage center in the region) have been the subject of detailed analysis in order to: determine the terms of sediment transfer in accordance with flows, obtaining evidence of understanding fluvial adjustment and highlight the presence of a fault, its causes and consequences. The results highlight the impact of antropogenic forcing on the topographic evolution of the active band. Solid flows are affected by different river training some have no function today, these structures causes a break in the continuity sediment. Thus the results in further incision of the main channel, an elevation of islands and side arms and an extension of the canopy. The results of this research are available to the river managers to guide them with more effectiveness regarding restoration of river within the riverbed.

Table des matières

Introduction	13
a. Contexte d'incision des lits fluviaux européens, une perturbation du flux solide induisant un déficit sédimentaire	18
b. Les objectifs de la thèse	20
1. Le problème d'incision et du réajustement du lit de la Loire, plus de 15 ans après l'arrêt des extractions de granulats, obtenir des éléments de compréhension du réajustement du lit mineur	21
2. Les travaux d'entretien du lit de la Loire, analyse de la réponse géomorphologique des secteurs faisant l'objet de travaux de restauration	22
3. Le rôle des chenaux secondaires dans la dynamique fluviale, déterminer les modalités de transfert des sédiments en fonction des débits	24
Organisation du manuscrit	Erreur ! Signet non défini.
Première Partie	28
Chapitre 1. Cadre général de l'étude et présentation des sites ateliers	28
1. Cadre général de l'étude	29
1.1 Caractéristiques géographiques de la Loire et de son bassin versant	29
1.2 Le contexte géologique	31
1.2.1 La largeur de la plaine et l'épaisseur des alluvions dans la Loire moyenne	36
1.3 L'influence climatique sur le bassin versant de la Loire	38
1.3.1 Un régime hydrologique complexe	39
2. Rappel sur l'évolution du lit de la Loire	43
2.1 La politique de mise en valeur et de gestion du lit de la Loire	43
2.2 Les résultats des principaux travaux de recherches menés sur la Loire	45
2.3 Les principaux facteurs de la métamorphose du système fluvial ligérien	53
2.4 Le manque d'études concernant le transport solide dans le lit de la Loire	57
3. Présentation des sites d'étude	59
3.1 Le site atelier n°1, La Charité-sur-Loire	64

3.2 Le site atelier n° 2, Mesves.....	70
3.3 Le site atelier n° 3, les méandres de Guilly	73
4. Le contexte de l'entretien du lit de la Loire.....	79
4.1 Typologie des travaux de restauration et d'entretien du lit.....	80
4.1.1 Les travaux réalisés dans le site de La Charité-sur-Loire	84
4.1.2 Les travaux réalisés dans le site de Mesves.....	90
4.1.3 Les travaux réalisés dans le site atelier de Guilly	92
Conclusion	93
Chapitre 2. Cadre Méthodologique : objectifs, critères du choix des sites, méthodes et outils.....	95
Introduction.....	96
a. Les dimensions spatio-temporelles dans le fonctionnement fluvial, définition des échelles spatio-temporelles.....	98
b. Mise au point de la méthodologie et du protocole de mesures, validation.....	100
1. Analyse diachronique pluri-décennale	102
1.1 Les données sources et leurs traitements	102
1.1.1 Cartes et photographies aériennes (1850 – 2005)	102
1.1.2 Les profils en long de la ligne d'eau	108
2. Analyse diachronique pluriannuelle, <i>en fonction des événements hydrologiques</i>	112
2.1 Analyse de l'évolution topographique de la bande active.....	112
2.1.1 Les Mesures topographiques.....	113
2.1.2 Mesures bathymétriques.....	115
2.1.3 Analyse des données topographiques et bathymétriques, acquisition et exploitation de données	120
2.1.3.1 Réalisation du bilan sédimentaire à partir des données topographiques et bathymétriques.....	122
a. Méthode de comparaison de profils topographiques.....	122
b. Création de Modèle Numérique de Terrain et calcul de volume	124
c. Le calcul de la marge d'erreur lors de la comparaison de deux M.N.T.....	126
2.1.4 Etudes de l'évolution spatiale du couvert végétal et son impact sur la topographie.....	128

2.1.4.1 La technique de prise de vue au moyen d'un ballon captif.....	128
2.2 Le Transport solide, protocole de mesure et d'analyse de la charge solide.....	132
2.2.1 Description du protocole de mesures et d'analyse des prélèvements de la charge solide à l'échelle fine	138
2.2.1.1 Les prélèvements sédimentaires	138
2.2.1.2 Mesure des éléments grossiers « le jard » :	143
2.2.1.3 Mesures du flux de matières en suspension	145
Conclusion	150
Chapitre 3. L'impact des extractions de granulat sur l'évolution verticale du plancher alluvial, croisement de deux approches à moyenne échelle.	
1. Les extractions de granulat dans la Loire et ses affluents.....	153
1.1 Les extractions de granulat dans le bassin de la Loire : quantités extraites dans les lits de la Loire et de ces affluents (1981 - 1993).....	154
a. Dans les lits majeurs de la Loire et ces affluents	154
b. Dans les lits mineurs de la Loire et ces affluents	155
1.2 Les extractions de matériaux dans en amont du Bec d'Allier entre 1981 et 1993 (Loire, Nièvre...)	157
a. Les extractions effectuées dans le lit majeur	157
b. Les extractions effectuées dans le lit mineur	159
1.3 Les extractions de matériaux en aval du Bec d'Allier (Nièvre, Cher, Loiret...)	161
a. Evolution des extractions dans le lit majeur (1981 – 1993)	161
b. Evolution des extractions dans le lit mineur en Loire moyenne (1960 – 1995)	163
c. Evolution des extractions dans le lit mineur en basse Loire (1949 -1995)	166
d. L'évolution interannuelle des extractions dans le lit mineur en aval du bec d'Allier (Loire moyenne et basse Loire)	167
2. Evolution des profils des lignes d'eau d'étiage : analyse et mise en relation avec le mode d'exploitation de granulat dans le lit mineur.....	174
2.1 Evolution des profils des lignes d'eau sur la période 1978 - 2011	174
a. Evolution du profil en long entre 1978 et 1988.....	174
b. Evolution du profil en long entre 1978 et 2005	177

b. Evolution des profils des lignes d'eau entre 2003 et 2011	181
Conclusion	185
chapitre 4.....	184
1. L'évolution des formes en plan dans les sites ateliers (1850 – 2005)	189
1.1 Site atelier de la Charité-sur-Loire	192
1.1.1 Évolution du style fluvial et impact du forçage anthropique	192
1.1.2 Rétraction de la bande active et expansion du couvert végétal.....	197
1.1.3 Une tendance à la sédimentation influencée par la végétation et les ouvrages fluviaux 202	
1.2 Le site atelier de Mesves	207
1.2.1 Métamorphose des formes fluviales et impact du forçage anthropique.....	207
1.2.2 Rétraction de la bande active et expansion du couvert végétal.....	210
1.2.3 Une tendance à la sédimentation influencée par la végétation	214
1.3 Le site atelier de Guilly	216
1.3.1 Évolution du style fluvial et impact du forçage anthropique	216
1.3.2 Rétraction de la bande active et expansion du couvert végétal.....	218
1.3.3 Une tendance à la sédimentation influencée par la végétation et les ouvrages fluviaux 223	
2. Implications de l'évolution des trois sites ateliers, <i>synthèse des résultats</i>	226
2.1 L'affaiblissement de la dynamique hydro-sédimentaire	226
2.2 Le développement rapide du couvert végétal.....	230
2.3 La réduction de l'intensité et de la fréquence des événements hydrologique	236
Conclusion	240
1. Analyse topographique et calcul du budget sédimentaire	243
1.1 Évolution topographique de la bande active	243
a. Site atelier de la Charité-sur-Loire	243
a.1 Le chenal principal	243
a.2 Les chenaux secondaires, <i>calcul du budget sédimentaire et analyse de l'impact des travaux de restauration</i>	257

<i>On constate une tendance permanente à l'érosion (dans la partie aval du bras A).....</i>	264
b. Site atelier de Guilly.....	278
b.1 Analyse topographique et calcul de budget sédimentaire	278
b.2 Actualisation des profils « Crougnaux », analyse topographique à moyen terme	286
c. site atelier de Mesves.....	290
c.1 Le chenal principal	290
1.2 Analyse de l'évolution des conditions hydrologiques (2007 – 2011)	299
1.2.1 Déterminer l'influence des évènements hydrologiques sur l'évolution morpho-sédimentaires de la bande active.	299
1.2.2 L'influence des débits liquides sur l'évolution de la charge solide en suspension dans le chenal principal.....	303
1.2.3 L'évolution transversale et verticale des concentrations de M.E.S en fonction des débits	304
Conclusion	308
1. Réflexion sur la gestion des espaces fluviaux.....	312
1.1 La rétraction de la bande active des lit fluviaux, <i>un phénomène répondu à l'échelle de la France</i>	312
a. L'influence de la végétation riveraine	312
a. Impact des extractions du granulat les l'hydrosystèmes fluviaux.....	314
b. L'effet morphogène des évènements hydrologiques	316
1. Contexte scientifique, apports de l'approche fondamentale.....	320
2.1 L'intégration des concepts fondamentaux dans notre travail de recherche	321
a. Le concept d'hydrosystème.....	322
a. Le Concept « <i>River-Continuum</i> »	324
c. Le « <i>Flood Pulse Concept</i> ».....	327
d. La notion d'équilibre dynamique	330
2.2 Classification des principaux styles fluviaux et mise en relation avec la géométrie du lit de la Loire moyenne.....	335
a. Les critères de classification des styles fluviaux.....	341

b. La particularité du tracé de la Loire par rapport aux systèmes de classification.	349
c. Classification du style fluvial de la Loire moyenne	353
Optimisation des travaux de restauration du lit de la Loire	361
3.1 Modèle d'analyse pour améliorer les travaux de restauration	363
c. Perspectives de restauration	374
c.1 Site atelier de La Charité-sur-Loire	374
c.2 Site atelier de Mesves	376
c.3 Site atelier de Guilly	377
Conclusion	379
Conclusion générale	381
Liste des figures	383
Liste des tableaux.....	447
Liste des photos.....	448

PREMIERE PARTIE

INTRODUCTION ET PRESENTATION DU CADRE GENERAL DE L'ETUDE

Introduction

Les cours d'eau et leurs espaces associés sont des milieux complexes à dynamiques non linéaire. Ils sont constitués d'un ensemble d'éléments hiérarchisés et interdépendants (la plaine, le cours d'eau et le bassin versant). Le concept d'hydrosystème mis en application dans l'approche d'analyse diachronique en géomorphologie fluviale « contemporaine » considère ces espaces comme un système ouvert à entrées-sorties et à processus-réponse fluviale (**Schumm, 1977 ; Amoros et Petts, 1993**). Ce concept met en évidence la complexité des rapports de cause à effet entre les variables de contrôle (débit solide, flux liquide et la pente globale du bassin versant) et les variables de réponse : selon **Hey (1988)**, ce sont la largeur du lit, la profondeur moyenne, la pente, la vitesse du courant, la profondeur maximale, la sinuosité et la longueur de l'arc du méandre (**Malavoi et Souchon, 1996**). Les échanges effectués entre les différentes composantes de cet hydrosystème se font selon trois axes spatiaux : un flux unidirectionnel *amont-aval*, un flux bidirectionnel transversal *chenal-plaine* et un flux bidirectionnel vertical *surface-compartiment souterrain*. Sur ces axes s'organise une mosaïque de formes et d'habitats qui abritent les métapopulations. Les variables de contrôle et de réponse évoluent en interaction à l'échelle du bassin versant. Ce dernier constitue une unité topographique et hydrographique à l'origine de l'alimentation des cours d'eau de sédiments (**Bravard et Petit, 1999**). Les différentes unités de l'hydrosystème (chenal, formes fluviales, plaine et bassin versant) évoluent à des échelles spatio-temporelles différentes (voir figure n°2). La pertinence de l'analyse géomorphologique est étroitement liée aux dimensions spatiales et temporelles appliquées. L'analyse géomorphologique va au-delà de la simple description des milieux. Elle se fonde sur une approche interdisciplinaire et propose une hiérarchisation des processus en intégrant les dimensions spatiale et temporelle à différentes échelles. Ces éléments sont très importants quand il s'agit d'analyser les réponses d'un hydrosystème à un changement imposé par des contraintes externes. **Shumm et Lichty (1965)**, ont montré que la relation entre les variables environnementales ou externes et la variable dotée de la capacité d'ajustement dépend de l'échelle de temps

considérée. A l'échelle du temps long (millénaires), seuls le climat et la géologie du bassin peuvent être considérés comme des variables indépendantes, toutes les autres variables du bassin étant ajustables de manière complexe (les pentes, la végétation et le sol). (*in Bravard et Petit., 1999 P.158*). De nombreuses études (*Peiry ,1988 ; Gautier, 1992 ;Piégay, 1994 ; Burnouf 1999*) montrent l'intérêt de prendre en compte le passé géomorphologique pour comprendre les processus morphodynamique actuels, la notion d'héritage géomorphologique s'avère fondamentale pour expliquer le comportement actuel d'un cours d'eau. Trois échelles temporelles peuvent être distinguées en fonction de leur intérêt et de leur pertinence dans l'étude des hydrosystèmes fluviaux (**Bravard, 1998**) :

L'échelle du Tardiglaciaire et de l'Holocène : elle correspond à la période de mise en place de fond de vallée (fourniture et transit sédimentaire). L'analyse des hydrosystèmes à ce pas de temps (long) nous renseigne sur les héritages géomorphologiques relevant des fluctuations climatiques et sur l'impact et l'influence anthropique sur le milieu.

L'échelle historique (derniers siècles) : cette période est marquée par l'influence de la péjoration climatique du Petit Âge de Glace, les cours d'eau évoluaient dans des conditions autres que celles qu'on connaît aujourd'hui, cette période est caractérisé selon **Tricart (1974)**, par une abondance de charge sédimentaire mobilisée dans les vallées au détriment du stock ancien. On note aussi l'influence des sociétés riveraines (l'ingénierie moderne). Ce pas de temps permet d'étudier les processus du réajustement du cours d'eau suite aux modifications apportés par l'homme (aménagements et ouvrages de navigation) et aux fluctuations climatiques.

L'échelle contemporaine (actuelle) : elle renseigne sur l'état actuel des cours d'eau sachant que ces derniers ont subi des modifications considérables par l'homme (barrages, digues, ponts, extraction massif de granulats...), cette échelle temporelle permet d'analyser le réajustement en cours du fleuve et d'évaluer le degré de déséquilibre « dynamique » des cours d'eau (réduction de la bande active, développement de la végétation et perturbation granulométrique) (**Berthois, 1959**). C'est au cours de cette période qu'on peut évaluer l'impact du contrôle ou du forage anthropique et naturel sur le fonctionnement des hydrosystèmes.

La dynamique fluviale est influencée par deux principaux facteurs : les changements hydroclimatiques et l'action anthropique. Ces derniers sont à l'origine des modifications voire perturbations du fonctionnement de l'hydrosystème. La perturbation du bilan sédimentaire suite aux fluctuations climatiques se traduit par une alternance de phases d'érosion et de remblaiement des lits fluviaux. **Pringle (2000)**, met en évidence la stabilité des rivières tropicales qui n'ont pas connu d'alternance de cycle de glaciation et de déglaciation par rapport aux fleuves européens qui eux ont subi d'importantes oscillations climatiques. Par ailleurs, l'étude réalisée par **Bravard (1994)**, sur le pourtour méditerranéen (datation des terrasses fluviales) met en évidence cette alternance de phases de remblaiement et d'incision des vallées à des échelles de temps plurimillénaires, et pluriséculaires. Le même auteur distingue deux types d'évolution des lits fluviaux. Le premier type concerne l'évolution sous contrôle hydroclimatique qu'il qualifie de phénomène réversible. Ce phénomène correspond à une alternance d'incision et de remblaiement du lit assurant un certain équilibre dynamique de la charge solide. Le second type correspond à une évolution sous contrôle anthropique pouvant aboutir à une situation de déséquilibre sédimentaire permanent (une tendance à l'incision), on parle de phénomène irréversible ou d'un dépassement de seuil de réversibilité (**Lefort, 2001**). La réponse de l'hydrosystème aux fluctuations climatiques est différente de celle engendrée par des modifications d'origine anthropique. De nombreux auteurs placent les causes anthropiques au premier rang des facteurs de changement irréversible des systèmes fluviaux, (**Nawson et Levin, 1991 ; Cubizolle, 1994 ; Gautier et al., 2001 ; Garcin et al., 2006**). Les conditions d'écoulement et du transit sédimentaire sont profondément perturbées par les divers aménagements conçus par l'homme : construction de barrages, endiguements usage des sols, extraction de granulats...

Les exemples de fleuves domestiqués et perturbés sont très nombreux à l'échelle du globe : sur le Nil, le barrage d'Assouan influence le transit sédimentaire. Il en résulte une érosion et une salinisation du delta du Nil (la mer gagne près de 10 m par an sur des terres agricoles) (**Lamontagne, 1992 ; Goiran et al., 2000 ; Bethemont, 2003**). En Chine le Yang-Tsé-Kiang illustre parfaitement l'effet de la pression anthropique sur les espaces fluviaux,

35 % de la population chinoise sont installés sur les marges du fleuve, 160000 industries réparties sur près de 50 villes. Les barrages hydro-électriques fournissent 40 % de l'énergie du pays. Cependant, les répercussions sur l'hydrosystème sont lourdes : pollution des eaux, érosion des sols et perte en biodiversité (**Lamontagne, 1992 ; Wilkinson, 2005**). On termine avec l'exemple du Mississippi qui draine un bassin versant d'une superficie égale à 6 fois celle de la France. L'installation de barrages et de digues a provoqué la diminution des superficies des zones humides de 90 % et la mise en culture du bassin versant a engendré des problèmes de pollution. Le forçage anthropique exercé sur les hydrosystèmes provoque donc un déséquilibre dans la répartition spatiale de la charge solide (problème d'érosion) et une dégradation des milieux (problème de pollution). (**Pardé, 1930 ; Meynier, 1956 ; Lamontagne 1992**).

Par ailleurs, il est important de souligner les enjeux liés au risque d'inondation (pertes humaines, matérielles et économiques), les installations humaines sur les plaines d'inondation favorisent la croissance de la vulnérabilité. On dénombre à l'échelle mondiale 500 millions de personnes affectées par les inondations dont 400 millions en Asie et 25000 morts par an suite à ces événements catastrophiques. D'après la Commission Européenne 1998, (www.actu-environnement.com) en Europe entre 1998 et 2006 les inondations ont été la cause de déplacement de 500.000 personnes, la mort de 700 personnes et environ 25 milliards d'euros de pertes (**Laborde, 2007**). La France recense 74 % de communes exposées au risque d'inondation. 80 % des dégâts produits par les catastrophes naturelles sont attribués aux inondations dont le coût des dommages est estimé à 250 millions d'euros.

L'échelle temporelle nécessaire pour la relaxation d'un système fluvial après perturbation varie du pas de temps décennal au pas de temps plurimillénaires (**Knighton, 1998**). Ce réajustement dépend des caractéristiques physiques et granulométriques du cours d'eau (la pente, la largeur du lit, la charge solide) et aussi de la fréquence et l'intensité des acteurs de perturbations naturelle ou anthropique. Cependant, on remarque que le forçage anthropique influence de façon permanente l'hydrosystème (comme l'endiguement, construction de barrages ou extraction de granulats. La fréquence et la dimension de ces

aménagements à augmentés de façon considérable au fil des années en raison des besoins sans cesse croissants des sociétés. En effet, l'intervalle de temps entre les différentes actions d'aménagement voir leur interférence ne correspond pas au temps nécessaire pour la relaxation du système fluvial, le problème qui se pose est un problème de fréquence et de durée de perturbation qui se traduisent par un déséquilibre entre le débit liquide et la charge solide. Par conséquent, on observe une perturbation permanente du fonctionnement du cours d'eau en raison des modifications successives qui ne respecte pas le temps de relaxation du système fluvial (voir figure 1). Il résulte de cette situation des problèmes chroniques comme le déficit sédimentaire (incision du plancher alluvial), la réduction de la biodiversité ou la pollution des eaux, ce qui provoque des modifications durables des processus de réajustement fluvial et conduit à une métamorphose du cours d'eau (Cubizolle 1996, Holbrook et Schumm 1998, Leteinturier et al 2000).

Tableau 1. Echelles spatio-temporelles d'ajustement fluvial misent en relation avec les différentes actions anthropiques à l'échelle de la Loire.

Ajustement fluvial			Exemples de forçage anthropique
Unité fluviale	Echelle spatiale (m)	Echelle temporelle (an)	
Microformes	10^{-1} à 10^1	10^{-1} à 10^1	<u>Endiguement</u> : influence permanente sur le débit liquide et solide (échange lit-plaine) <u>Barrage</u> : influence permanente sur le débit liquide et le transfert longitudinal des sédiments <u>Extraction de granulat</u> : influence sur l'équilibre sédimentaire à l'échelle du profil en long (prélèvement journalier sur plusieurs années)
Styles fluviaux	10^1 à 10^3	10^1 à 10^3	<u>Prélèvement d'eau</u> : influence les réserves souterraines, pollution (fréquence journalière)
Profil en long	10^3 à 10^4	10^3 à 10^4	<u>Ouvrage de navigation (chevrette et d'huis)</u> : influence permanente sur la vitesse et la direction des courants et sur la répartition spatial du stock sédimentaire

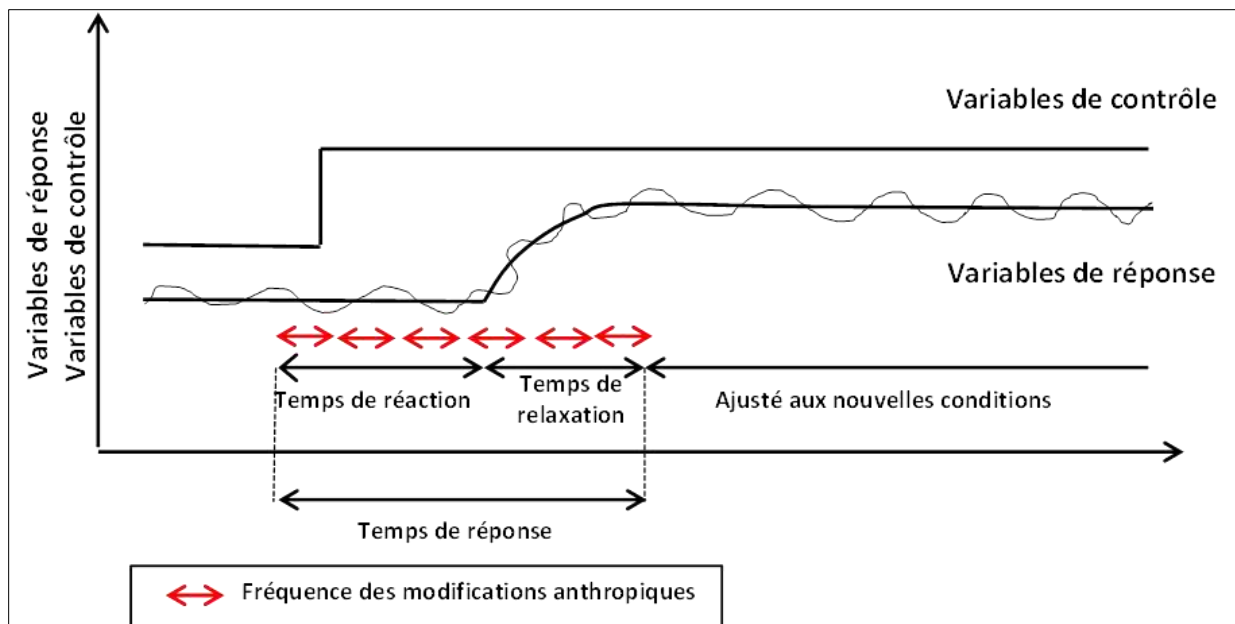


Figure 1. Réponses d'un système fluvial aux modifications brutales d'une variable de contrôle (d'après Knighton, 1984 in Rollet, 2007, modifiée).

La fréquence des modifications anthropiques (aménagement et exploitation de granulat) perturbent les processus de réajustement fluvial.

a. Contexte d'incision des lits fluviaux européens, une perturbation du flux solide induisant un déficit sédimentaire

L'alternance de phase d'incision et de remblaiement des lits fluviaux est un phénomène morphodynamique naturel. Cependant, les perturbations d'origine anthropique peuvent avoir des impacts irréversibles (**Bravard, 1994**). Un bon nombre de cours d'eau européens et français connaît une dynamique fluviale à tendance érosive. De nombreuses études réalisées à ce sujet confirment la tendance d'incision des lits fluviaux : l'aménagement (digues) du Rhin au niveau de la ville de Bâle empêchait toute divagation du lit. Cela a provoqué une incision de 7 m en 75 ans (**Tricart et Bravard, 1991**). La même tendance d'incision du plancher alluvial est constatée sur les rivières bavaroises, sur l'Isar, l'incision atteignait 5 m au nord de Munich en 1905 et 4 m entre 1903 et 1925 sur la Lech suite à l'endiguement du lit au sud d'Augsbourg en 1851 (**Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft, 1984 in Reich, 1994**). Dans les Alpes du sud, **Gautier (1994)**, constate une incision sur les parties endiguées du Buèche. Cette incision est en grande partie la conséquence des extractions de granulats et d'autres facteurs naturels (décroissance des

grandes crues et les fortes pentes du lit). Sur l'Isère (Alpe du sud) l'érosion fluviale moyenne est estimée à 2 Mt an⁻¹ (Vautier, 2000 ; Dumas, 2008). Sur le Rhône (dans la traversée de la ville d'Arles) l'incision verticale du lit est expliquée par les caractéristiques locales du lit (lithologie et forme) et par des facteurs régionaux : baisse des débits liquides et diminution de la charge solide en provenance du bassin versant (Antonelli et al., 2004) la liste des exemples de lits fluviaux concernés par l'enfoncement du plancher alluvial est longue : sur la Drôme et l'Ardèche (Piégay et Landon, 1994), l'Ain (Bravard et al., 1989), l'Arve (Peiry, 1989 ; Blanc et al., 1989) et l'Herbasse (Landon et al., 1993). D'après les différents exemples cités précédemment, l'endiguement du fait de son ancienneté semble être parmi les premiers facteurs qui ont favorisé le déclenchement des processus d'incision du plancher alluvial (pas de possibilité de divagation). Quant-aux extractions de granulats, elles ont provoqué une accélération du phénomène d'enfoncement en favorisant une érosion régressive en amont des sites d'extraction et une érosion progressive en aval de ces sites. Il en résulte un abaissement du plancher alluvial. S'ajoutent à cela les effets cumulatifs des barrages, usage du sol et fluctuations climatiques. L'incision des lits fluviaux favorise le phénomène de « chenalisation ». Cela peut s'expliquer par l'interdépendance entre la largeur du lit et le profil en long (Schumm, 1977). Le dessin en plan du cours d'eau et sa géométrie s'ajustent en fonction des fluctuations des flux solide et liquide (Schumm, 1968). L'abaissement du lit favorise dans la majorité des cas le développement de la végétation qui à son tour influence la répartition spatiale du stock sédimentaire au sein de la bande active (Berthois, 1959 ; Rodriguez, 2004 ; Grivel, 2008) le développement du couvert végétal se fait au détriment des annexes d'écoulements du fait de la réduction de la durée de submersion de ces dernières (abaissement de la ligne d'eau suite à l'enfoncement du lit).

Déficit sédimentaire, développement de la végétation, réduction de la section mouillée ce sont les problèmes auxquels sont confrontés gestionnaires et scientifiques aujourd'hui. La Loire, objet de ce travail de recherche a connu le même sort, les gestionnaires du fleuve sont confrontés aux problèmes d'incision du chenal principal (Gazowski, 1994 ; Gautier et al., 2001) et du développement rapide de la végétation au sein du lit entre les levées. Cela a

engendré des problèmes d'ordre géomorphologique, écologique et social. La compréhension des modalités de l'évolution morphosédimentaire du lit à travers l'étude des interactions «**végétation-flux solide**» et «**aménagements-flux solide**» sont au cœur des préoccupations des gestionnaires. Le présent travail s'inscrit dans cette optique de recherche appliquée, il porte sur la dynamique fluviale actuelle de la Loire et les possibilités de restauration mises en œuvre par les gestionnaires. La thèse croise une approche géomorphologique du fonctionnement actuel du lit actif de la Loire et les préoccupations des gestionnaires qui mettent en œuvre différentes actions visant à améliorer les conditions d'écoulement des eaux et des sédiments. Dans quelle mesure ces travaux permettent-ils d'enrayer l'enfoncement du plancher alluvial ?

Notre analyse prend en considération l'héritage géomorphologique, l'impact du forçage anthropique, hydroclimatique et les enjeux de gestion sur le fonctionnement du système fluvial. La question fondamentale portant sur la réponse géomorphologique de l'hydrosystème suite aux perturbations anthropiques et naturelles sera abordée à travers l'étude de deux exemples de styles d'écoulements : le style dit « proche de l'anastomose » et le style méandriforme. Les conditions de l'évolution du style fluvial et les dimensions spatio-temporelles de cette évolution sont pris en compte. Cela permet d'analyser les conséquences des perturbations anthropiques de l'hydrosystèmes. Nous proposons dans un premier temps d'exposer de façon plus détaillée les objectifs de recherche avant de présenter un bref rappel des principaux traits de l'évolution morphodynamique du lit de la Loire.

b. Les objectifs de la thèse

Les objectifs de notre travail de recherche s'articulent autour de trois principaux thèmes de réflexion :

1. Le problème d'incision et du réajustement du lit de la Loire, plus de 15 ans après l'arrêt des extractions de granulats, obtenir des éléments de compréhension du réajustement du lit mineur

La Loire a connu une intense extraction industrielle de granulat et plus particulièrement de sables au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Ces extractions ont été effectuées dans le lit mineur préalablement perturbé par d'autres travaux d'aménagements et aussi par les pratiques socio-économiques. Cette exploitation à grande échelle effectuée entre 1950 et 1990 a eu pour conséquence l'aggravation du déficit sédimentaire, ce qui a favorisé l'incision du lit. Il en résulte une différence de niveau topographique entre le cours d'eau principal et les bras secondaires. Le matériel transporté peut constituer, selon la compétence du cours d'eau, des bancs de sable ou galets susceptibles de combler les bras secondaires favorisant ainsi le phénomène de «chenalisation». La réduction de la section mouillée favorise le débordement rapide et peut aggraver considérablement les risques d'inondation en cas de crue. Sans oublier les menaces que représente cet abaissement du plancher alluvial pour les ouvrages, comme la déstabilisation des digues et des ponts (effondrement du Pont Wilson à Tours en 1978). Conscient de la gravité de la situation et après concertation, les ministères de l'Environnement, de l'Industrie, des Transports et le Syndicat National des Producteurs de Sable et Gravier ont mis en œuvre un protocole afin de mettre un terme à l'extraction excessive de granulats dès 1981. En raison des difficultés de reconversion de la profession l'arrêt des extractions de sédiment dans le lit mineur de la Loire est passé par plusieurs étapes : réduction des prélèvements à moitié en 1986, un arrêt quasi total en 1992 (à quelques exceptions près). Il faut attendre 1995 pour que le protocole d'interdiction soit strictement respecté sur la totalité du lit de la Loire (Gasowski, 1994). Des questions se posent quant à l'effet de cet arrêt de prélèvement de sédiments sur les processus de réajustement du plancher alluvial. Notre objectif est double :

- Répondre à la question : l'incision du lit est-elle enrayée 16 ans après l'arrêt des extractions ? Les moyens :

le suivi du plancher alluvial à échelle moyenne (profil en long)

La remobilisation de la charge de fond à grande échelle sur des sites faisant l'objet de travaux de restauration

- Analyser l'évolution topographique du chenal afin de déterminer le rythme d'évolution du plancher alluvial et établir un bilan sédimentaire pour déterminer les modalités de transport solide et déduire la tendance de l'évolution vertical du fond du chenal principal. Cette analyse est effectuée à l'échelle des sites ateliers.

Les résultats de cette analyse permettent de savoir si l'arrêt des extractions de granulats dans le lit mineur est suffisant pour palier l'incision du chenal et d'évaluer le rythme d'évolution vertical du plancher alluvial.

Nous nous sommes intéressés particulièrement à l'influence des ouvrages et seuils (chevrette, points durs) sur la dynamique hydrosédimentaire au sein de la bande active. L'objectif est d'analyser l'effet de ces seuils sur le transfert de la charge solide. Une étude anglaise réalisée par **Hooke et Harvey (1983)**, sur la rivière Oane en Angleterre met en évidence l'effet des seuils sur la divergence des courants, ce qui peut influencer les modalités du transport de la charge solide. Partant du même principe, nous avons procédé à une localisation précise des différents points durs (seuils durs artificiels et naturels), leurs dimensions et leurs orientations par rapport au sens de l'écoulement. Ces informations sont corrélées avec les résultats issus de l'analyse de l'évolution topographique du lit mineur. Le but de cette approche est d'analyser l'influence des points durs sur la répartition spatiale des mouilles, banc et seuils et par conséquent sur le stock sédimentaire et aussi de savoir si la présence de ces seuils aggrave le problème d'incision du plancher alluvial.

2. Les travaux d'entretien du lit de la Loire, analyse de la réponse géomorphologique des secteurs faisant l'objet de travaux de restauration

Suite à la mise en place du Plan Loire Grandeur Nature en 1994, le Domaine Public Fluvial a bénéficié d'un budget important pour la restauration et l'entretien du lit de la Loire. Ainsi depuis 1995, de nombreux travaux d'entretien du lit de la Loire ont été entrepris. Ces interventions s'inscrivent dans le volet « sécurité des populations face aux risques d'inondation » du PLGN. Les travaux sont réalisés en vue d'améliorer la capacité

d'écoulement en crue, enrayer l'enfoncement de la ligne d'eau à l'étiage et préserver la biodiversité des milieux. Ces interventions visent aussi la restauration linéaire des ouvrages implantés dans le lit mineur : dhuis, épis. Les travaux sont codirigés par le Service Hydrologie et Voies Navigables (SHVN) de la Direction Départementale de l'Équipement de la Nièvre (DDE 58 devenue DDT) dans le département de la Nièvre et de la Saône-et-Loire (71) en Bourgogne et du Cher (18) et Loiret en région Centre. Des chantiers expérimentaux ont été définis en Loire moyenne pour tester des techniques de restauration. Les interventions consistent en la mise en œuvre de travaux de nettoyage du lit mineur par arrachement de la végétation, ouverture des bras secondaires (remobilisation de sédiments) et reconstitution du milieu naturel. Nous avons réalisé en 2006 dans le cadre du Master 2 une étude ayant pour objectif la reconstitution d'un document de synthèse sur l'impact géomorphologique des travaux d'entretien du lit de la Loire moyenne. Ce dernier regroupe les différentes opérations de restauration et entretien du lit de la Loire (réalisé depuis 1994 entre Fourchambault et Myenne) et a été mené en collaboration avec la DREAL Centre. Nous avons effectué un diagnostic relatif à l'impact géomorphologique de ces interventions. Il est ressorti de cette étude les remarques suivantes :

- la faible expérience des intervenants dans le domaine de la restauration des milieux rivulaires. Cela nous amène à considérer ces travaux comme des « opérations tests » permettant d'avoir une idée sur la réponse du fleuve à ces modifications.
- l'absence de diagnostic géomorphologique préalable aux travaux.
- le manque, voir l'inexistence de données quantitatives relatives à l'évolution morphodynamique de ces secteurs, autrement dit un état de référence (topographie, transport solide, évolution spatial du couvert végétale).
- La complexité du fonctionnement de ces milieux rend la tâche de restauration assez difficile. Les formes fluviales sont en mutation permanente et la vitesse de leur évolution dépasse parfois la fréquence des interventions humaines. S'ajoute à cela l'extension rapide du couvert végétal.

Ce constat met en évidence la nécessité d'effectuer un suivi continu de ces sites d'interventions au moyen de mesures *in situ* menées à une échelle fine. C'est pourquoi, les sites d'études retenus dans le cadre de ce travail de thèse sont concernés directement par les travaux de restaurations. Cette collaboration entre gestionnaires et chercheurs permet d'établir un protocole d'intervention fondé sur une analyse géomorphologique réalisée avant et après travaux. Cela en vue d'approfondir et d'affiner les connaissances et de développer de nouveaux outils de suivis et d'aide à la décision. Notre approche d'analyse est établie à partir d'un suivi topographique précis au sein des secteurs faisant l'objet de travaux d'entretien. Le premier objectif est de localiser et de quantifier les secteurs affectés par l'érosion et les zones d'accumulation sédimentaire et mettre en évidence l'influence du couvert végétal sur les modalités d'évolution hydrosédimentaire dans les secteurs concernés par les travaux d'entretien (dévégétalisation). Cela permet d'évaluer la réponse géomorphologique de ces sites suite aux opérations de restauration.

Le second objectif est d'améliorer les travaux futurs à travers la mise en place d'un protocole de mesure précédant les interventions de restauration (à l'échelle de la Loire moyenne). Ce dernier est établi à partir de plusieurs indicateurs issus d'analyse de documents et des mesures sur le terrain. Il permet : d'identifier les sites de restauration prioritaires, de déterminer la fréquence des travaux et d'évaluer leur efficacité.

Les résultats obtenus apportent des éléments de compréhension indispensables afin d'établir un diagnostic géomorphologique susceptible de mettre en lumière la réponse géomorphologique suite aux travaux d'entretien, évaluer l'efficacité de ces travaux et déterminer la fréquence, le type et l'échelle spatiale nécessaire pour mener à bien les opérations de restauration.

3. Le rôle des chenaux secondaires dans la dynamique fluviale, déterminer les modalités de transfert des sédiments en fonction des débits

Depuis une cinquantaine d'années, le lit de la Loire moyenne connaît une métamorphose qui se traduit par un développement rapide de la végétation. La réduction de la bande active est étroitement liée au rythme de fermeture des bras secondaires par comblement. D'un point de vue géomorphologique, les bras secondaires représentent des espaces de

stockage et de transfert de la charge sédimentaire. D'un point de vue hydrologique, ils permettent d'abaisser les lignes d'eau de crue. Le déséquilibre morphosédimentaire constaté sur la Loire est en grande partie lié à l'ensablement des chenaux secondaires. Ces derniers sont caractérisés par un fonctionnement très complexe du fait de la variété de leurs caractéristiques physiques (la longueur, la largeur, la pente et le positionnement dans le lit), leur degré de végétalisation, la granulométrie du stock sédimentaire, le fonctionnement hydrologique (la durée/fréquence de submersion) et enfin la présence d'aménagements (chevrette, épis, pieux) qui rendent l'analyse encore plus complexe. L'étude du fonctionnement de ces formes spécifiques nécessite la prise en compte des caractéristiques locales. Maintenir ces bras actifs est une démarche essentielle pour lutter contre l'extension du couvert végétal le rattachement des îles et par conséquent la rétraction de la bande active. De ce fait, ces annexes d'écoulement jouent un rôle déterminant dans la dynamique hydro-sédimentaire au sein du lit mineur. En cas de crue les bras secondaires facilitent l'extension de la lame d'eau baissant ainsi les lignes d'eau vers l'aval. Placés au cœur des préoccupations des gestionnaires, l'entretien des chenaux secondaires est une question prioritaire. Les sites de restaurations concernent souvent des portions de chenaux secondaires. Il s'avère donc indispensable de comprendre leurs fonctionnements afin de mettre en œuvre une politique de restauration efficace. Nos objectifs consistent à analyser trois points :

- l'évolution spatiale des bras secondaires afin de déterminer l'évolution de leurs caractéristiques physiques : la longueur et la largeur et d'effectuer une typologie de l'évolution du couvert végétal. Cette approche permet de cibler préalablement les secteurs clés de sédimentation et d'érosion et de déterminer la dynamique sédimentaire au sein de ces bras à un pas de temps pluri-décennal. Elle permet aussi de déterminer le rythme d'extension du couvert végétal et l'impact de la végétation sur l'évolution morphosédimentaire de ces chenaux.
- les modalités de transport solide au sein des bras. Il faut analyser dans un premier temps l'évolution topographique du chenal afin de définir avec précision les zones d'érosion et de sédimentation, de quantifier leurs volumes et de définir les caractéristiques générales de

cette évolution. On procèdera par la suite à la caractérisation du stock sédimentaire à une échelle plus fine (banc), l'objectif est de déterminer les différentes classes granulométriques des dépôts et calculer les forces tractrices nécessaires pour la mise en mouvement des sédiments et enfin estimer les distances parcourues par les sédiments. Cette approche permet d'obtenir des éléments renseignant sur la capacité de transport et les volumes de sédiments mobilisés.

- le fonctionnement hydrologique des bras secondaires. Il s'agit d'analyser la réponse géomorphologique de ces annexes d'écoulements suite aux événements hydrologiques (crue, hautes eaux et basses eaux). Cela permet de définir la durée de submersion des bras et de déduire leur capacité de transport de la charge solide (le débit d'entraînement des grains).

Nous tentons à travers cette étude d'effectuer un diagnostic géomorphologique pour expliquer les modalités de transport solide et le rôle morphogène de la végétation, des débits liquides et des anciens aménagements. Nous portons un intérêt particulier aux connexions amont et aval des chenaux secondaires avec la Loire. Ces zones de contact sont des lieux de contrôle de l'activité hydrosédimentaire ces années d'écoulement. Les sites ateliers retenus vont servir de laboratoire pour les différentes méthodes de mesures. Deux types de bras secondaires feront l'objet d'analyse à grande échelle : le chenal secondaire du site de la Charité-sur-Loire et le bras du site de Mesves. Le premier est caractérisé par la présence de nombreux aménagements et le second évolue dans un contexte plus ou moins naturel. L'analyse comparative des deux sites permet de mettre en évidence l'influence des différents aménagements sur le fonctionnement des bras. Les résultats obtenus serviront d'éléments de compréhension pour la mise en œuvre de perspectives d'entretien dans un contexte de gestion durable de ces espaces.

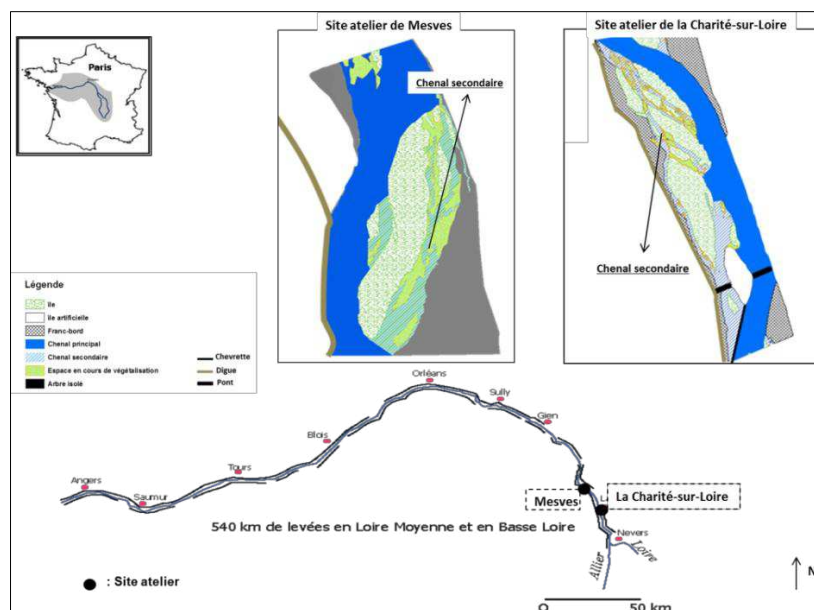


Figure 2. Localisation des bras secondaires étudiés dans les sites ateliers de la Charité-sur-Loire et Mesves.

Première Partie

Chapitre 1. Cadre général de l'étude et présentation des sites ateliers

Cadre général de l'étude

1.1 Caractéristiques géographiques de la Loire et de son bassin versant

La Loire prend sa source au Mont Gerbier-de-jonc dans le Sud-Est du Massif Central à une altitude de 1408 m (Département de l'Ardèche). Elle parcourt 1012 km, ce qui en fait le plus long fleuve de France. Ce dernier n'est au départ qu'une multitude de petits ruisseaux qui se rejoignent progressivement. La présence d'une nappe phréatique sous le mont Gerbier-de-Jonc donne naissance à de multiples sources, trois d'entre elles situées au pied du mont étant considérées comme sources du fleuve.

Tableau 2. Caractéristiques physiques, administratives et démographiques du bassin versant de la Loire.

Nom du fleuve	Longueur	Orientation	Estuaire	Superficie du bassin versant	Caractéristiques administratives	Caractéristiques démographiques	principaux affluents
La Loire	1012 km	De la source à Briare : SSE-NNO Dans l'orléanais : Est-Ouest	Saint-Nazaire (dans l'océan Atlantique)	117054 km ²	10 régions, 33 départements et 5700 communes	7755583 habitants, soit une densité de 66 hab/km ² (recensement de 1999)	l'Allier, le Cher, l'Indre, la Vienne, l'Arroux, la Besbre, L'Authion et la Maine

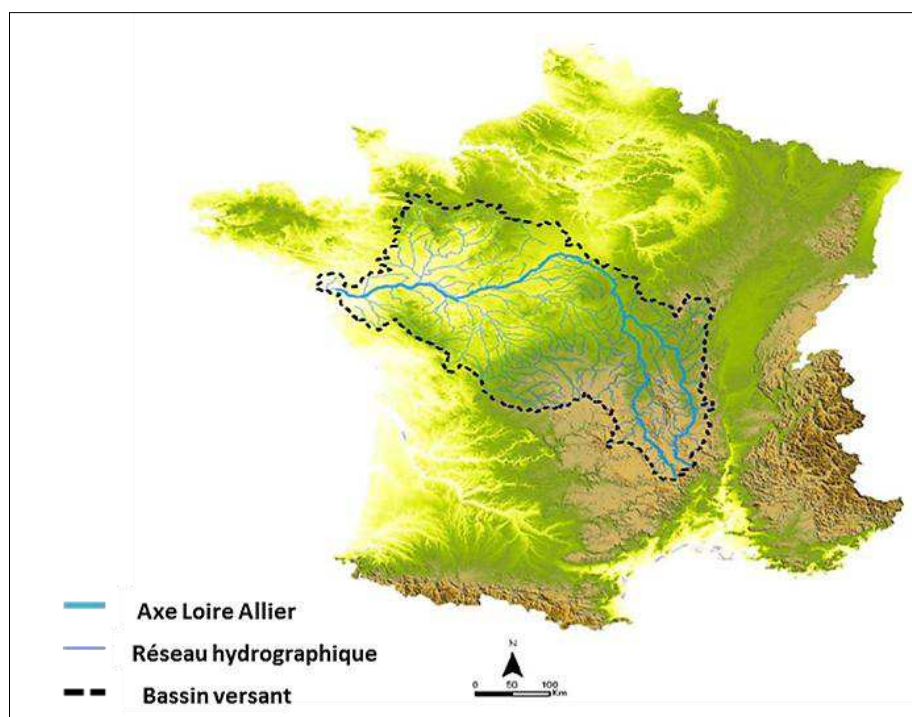


Figure 3. Localisation et caractéristiques physique du bassin versant de la Loire (Source : IGN)

Le cours de la Loire est divisé en trois segments : la haute Loire, la Loire moyenne est la basse Loire. Ces trois parties recèlent des caractéristiques géomorphologiques, géologiques et biogéographiques différentes. Le cours supérieur de la Loire s'étend depuis la source jusqu'à la confluence avec l'Allier (le Bec d'Allier). Le long de ce tronçon la Loire traverse des gorges relativement encaissées et des versants abrupts. La pente est d'environ 4 à 5 m/km. En moins de 300 km depuis la source le fleuve passe d'une altitude de 1400 à 270 mètre à son entrée dans la plaine de Roanne, il parcourt 197 km de gorge, contre seulement 97 km de cours en plaine (**Babonaux, 1970**). A la sortie de cette zone montagnarde, le fleuve trouve plus de possibilités de divagation latérale sur un substratum constitué d'argile, calcaire et sable. A partir de Bourbon Lancy, la plaine s'élargie et marque son entrée dans les marges méridionales du bassin Parisien. Cette espace de liberté offre au fleuve la possibilité de se déplacer latéralement. Loire prend alors la forme de méandres mobiles. La valeur de la pente diminue à 1,3 m/km dans la section de Balbigny à Villerest et chute à 0,7 m/km au environ de Nevers.

Le tronçon médian de la Loire est le secteur où nous avons mené nos recherches. Il commence à l'aval du Bec d'Allier et se termine au bec de Maine (Angers), soit un linéaire d'environ 400 km, ce secteur correspond au «val endigué» traversant les plateaux calcaires du sud du Bassin parisien. Il est caractérisé par l'omniprésence des îles au sein du lit mineur, ces formes insulaires prennent dans la majorité des cas une position latérale au sein du lit mineur. D'un point de vue géomorphologique la position des îles favorise leurs rattachements au franc-bord. Cela influence la compétence du fleuve dans les chenaux secondaires qui séparent ces îles des berges (réduction de la largeur et de la capacité de transport des bras). S'ajoute à cela la présence de digues le long du fleuve réduisant l'espace de liberté de ce dernier. Ainsi la plaine d'inondation ne participe pas à la dynamique sédimentaire du fleuve, les apports de charge solide proviennent des bassins amont et des affluents de la Loire comme l'Allier dont l'apport sédimentaire est deux fois supérieur à celui de la Loire dans la zone de confluence (**Babonaux, 1970**). La pente du fleuve est d'environ 0,5 m/km à l'aval de la confluence avec l'Allier et 0,35 m/km entre Orléans et Saumur (**Brosse, 1982 ; Gautier 2006**).

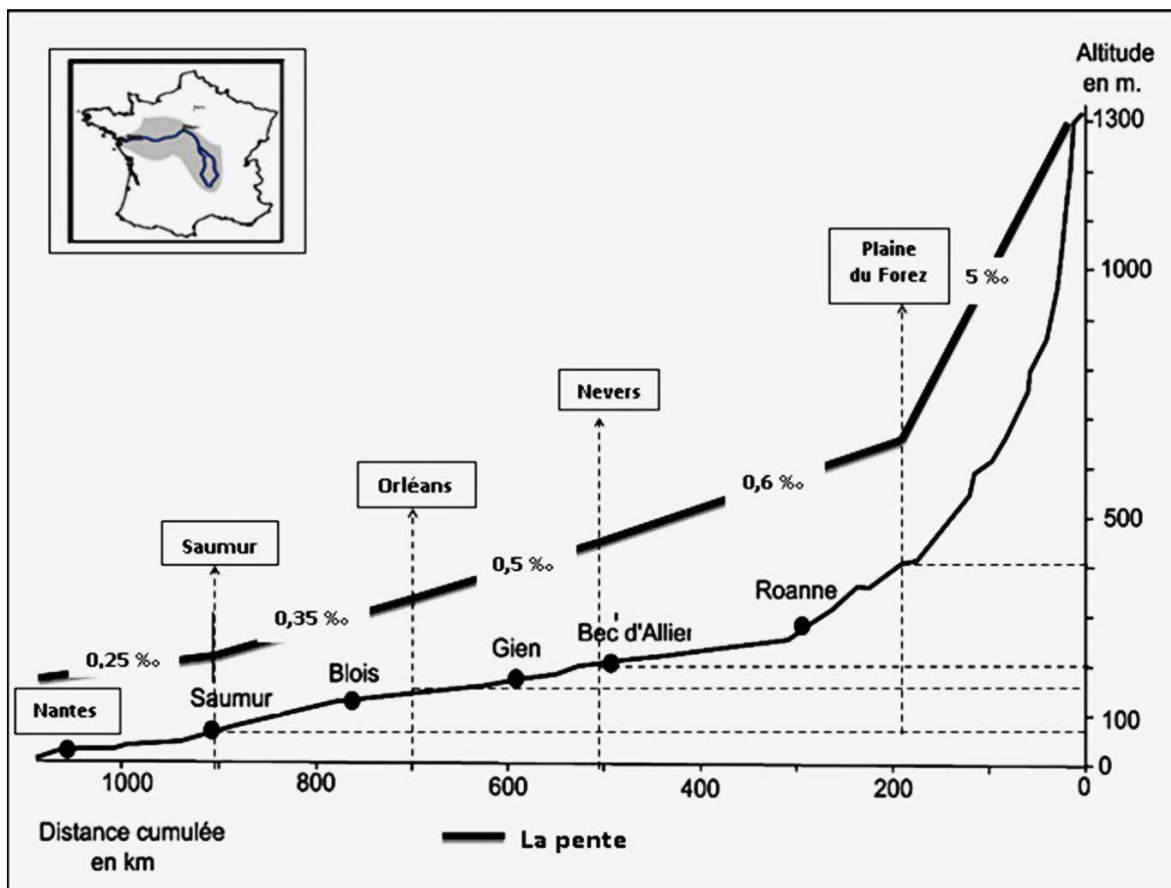


Figure 4. Caractéristiques du profil en long de la Loire, la pente du secteur de la Loire moyenne varie entre 0,5 et 0,3 m/km (source des données: Brossé 1982, adaptée).

1.2 Le contexte géologique

On distingue deux grands types de domaine sur le bassin versant de la Loire : le domaine de socle et le domaine sédimentaire. Ces derniers donnent naissance à trois unités géologiques : le Massif central, le Massif armoricain pour le domaine de socle et le bassin Parisien pour le domaine sédimentaire. Selon l'histoire géologique ces trois unités appartiennent au grand ensemble géologique qui a constitué la grande chaîne de montagne hercynienne il y a 300 Ma (2^{ème} partie du Paléozoïque). Soumises à l'action de l'érosion dès 255 Ma, les roches de cette chaîne constituent aujourd'hui l'ossature géologique de l'Europe de l'ouest. Elles affleurent dans le Massif central et le Massif armoricain et constituent le substratum des roches sédimentaires plus récentes du bassin de Paris. Le haut cours de la Loire draine les terrains du Massif Centrale constitué essentiellement de gneiss et granites (Limousin, Millevaches, Morvan, Forez) leur mise en place date -400 et -300 Ma, de gneiss d'âge antérieur à l'histoire varisque (série cévenole

près de la source de la Loire), de micaschistes, voire localement des basaltes (volcans d'Auvergne notamment), la plaine d'inondation de la Loire (plaine, du Forez) est constituée de sédiments de l'Eocène et de l'Oligocène (Nehlig, 2010).

Le cours moyen de la Loire traverse le sud-ouest du bassin Parisien, le substratum est constitué de couvertures sédimentaires successives. Entre Decize et Briare le fleuve traverse des terrains de grès, calcaires et argiles (déposés entre -225 et - 65 Ma). Le centre du bassin de la Loire est constitué de : sables de Sologne et calcaires karstiques de Beauce déposées au Cénozoïque de -65 Ma à nos jours (aux environs d'Orléans).

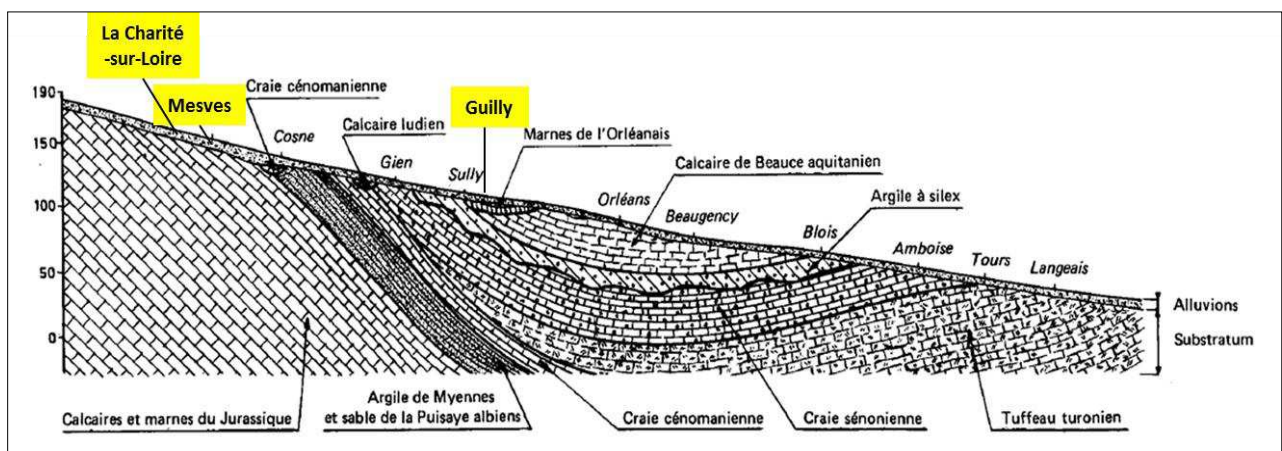


Figure 5. localisation des site ateliers dans le schéma de la structure géologique de la Loire moyenne (réalisé par Champion et *al.*, 1971).

Aux Ponts-de-Cé, la Loire marque son entrée dans le Massif armoricain constitué de granites, gneiss et micaschistes. Elle traverse des terrains sédimentaires paléozoïques jusqu'à Ancenis, puis une série métamorphique jusqu'à Nantes où apparaissent les granites du cisaillement sud-armoricain (Babonaux, 1970 ; BIOTOP, 2005 ; Nehlig, 2010).

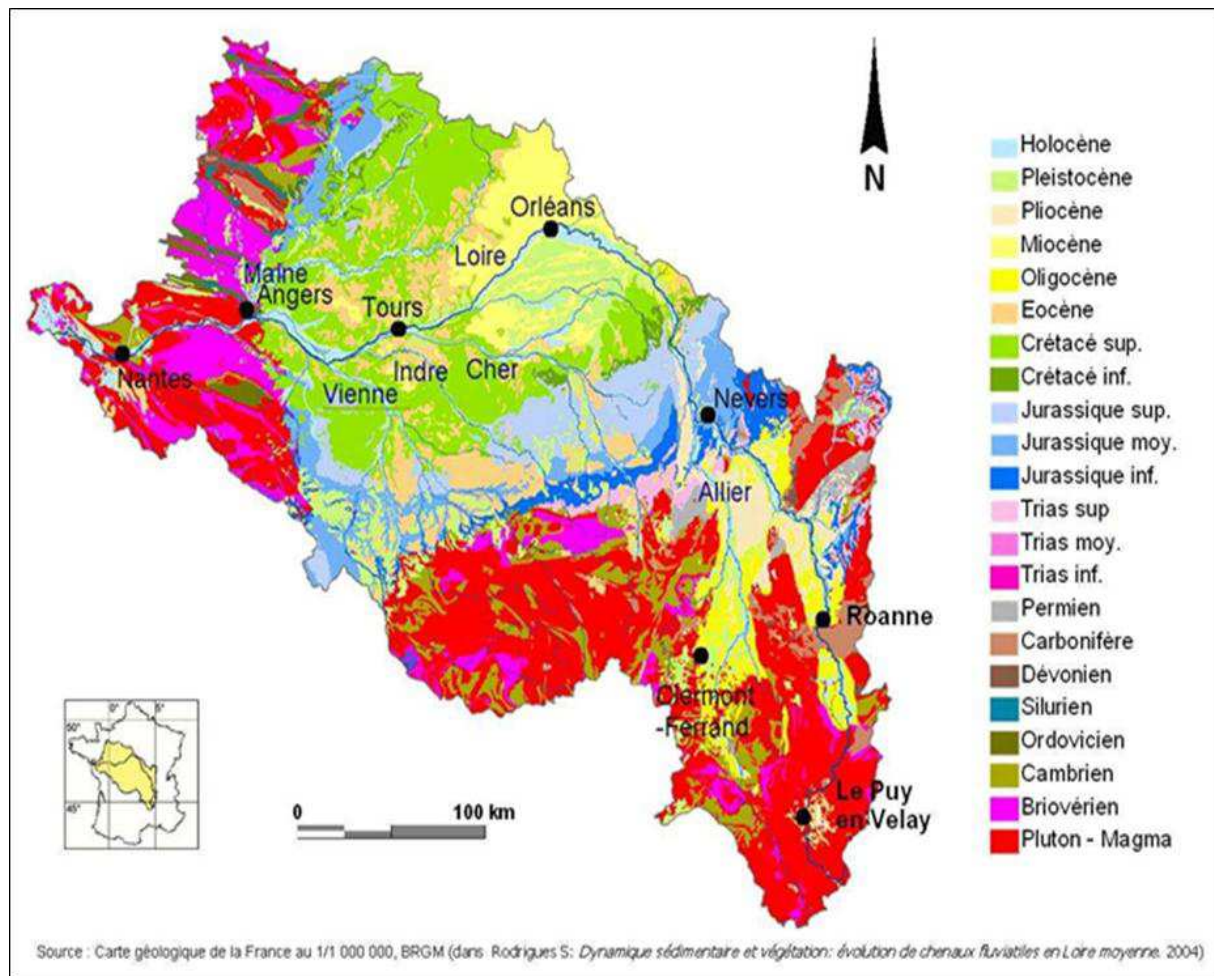


Figure 6. Carte géologique du bassin versant de la Loire (source : BRGM).

L'étude réalisée par **Wasson et al (1996)**, a abouti à un découpage régional du bassin de la Loire en «hydro-éco-région». Ce découpage est élaboré à partir des critères suivant : la géologie, le climat, le relief et l'hydrogéologie (**Andriamahefa, 1999**). Les résultats obtenus mettent en évidence 18 régions regroupées dans sept types de régions majeures :

- Volcanique, concerne le Velay et l'Auvergne, ce type volcanique intègre deux sous-types : le premier correspond aux champs basaltiques et aux cônes de cinérites (aréiques) et le second aux plateaux basaltiques à écoulement superficiel plus développé (vallées incisées jusqu'au niveau du socle).
- Cristallin, Caractérisé par une dominante de roches cristallines, granites à deux micas et gneiss. Le type cristallin regroupe plusieurs sous-types (Hautes-Terres vellaves, l'oriental Forez-Margeride, les gorges de l'Allier et les hautes terres du Gévaudan, Morvandiau,

Disséqué au sud du Morvan, limousin, Manceau-vendéen et Armoricaïn centré sur la vallée de l'Oudon).

- Bassins et fossés tectoniques, ce sont des unités disjointes qui ont en commun leur origine tectonique (bassins d'effondrement limités par des escarpements de failles). On distingue les grands bassins tectoniques parcourus par la Loire et l'Allier, plaine du Forez et Limagnes, les bassins de taille intermédiaire, Livradois et fossé du Cher et les petits bassins intra-montagneux, comme celui du Puy ou de Monistrol.

- La couverture sédimentaire, ce type comprend quelques formations de contact à dominante calcaires (Bourbonnais, Boischaut). La densité du réseau hydrographique est plus faible. On distingue les tables calcaires méridionales au sud de l'axe ligérien, les tables calcaires massives au nord de la Loire, la Beauce et la Brenne et la Sologne caractérisées par leur couverture forestière et un grand nombre d'étangs. Nos sites d'études se trouvent au sein de ce type d'hydro-écorégion.

- La Loire et le cours inférieur de ses affluents en rive gauche (Cher, Indre, Vienne) sont caractérisés par des coteaux crayeux dominant de larges vallées à fond plat.

- Les marais du cours terminal, distingué par ces caractéristiques hydrologiques : la Brière, la Goulaine et le lac de Grandlieu, constituent des unités caractérisées par la stagnation des eaux.

- L'estuaire, caractérisé par l'interférence des phénomènes fluviaux et maritimes et fortement influencé par les actions anthropiques.

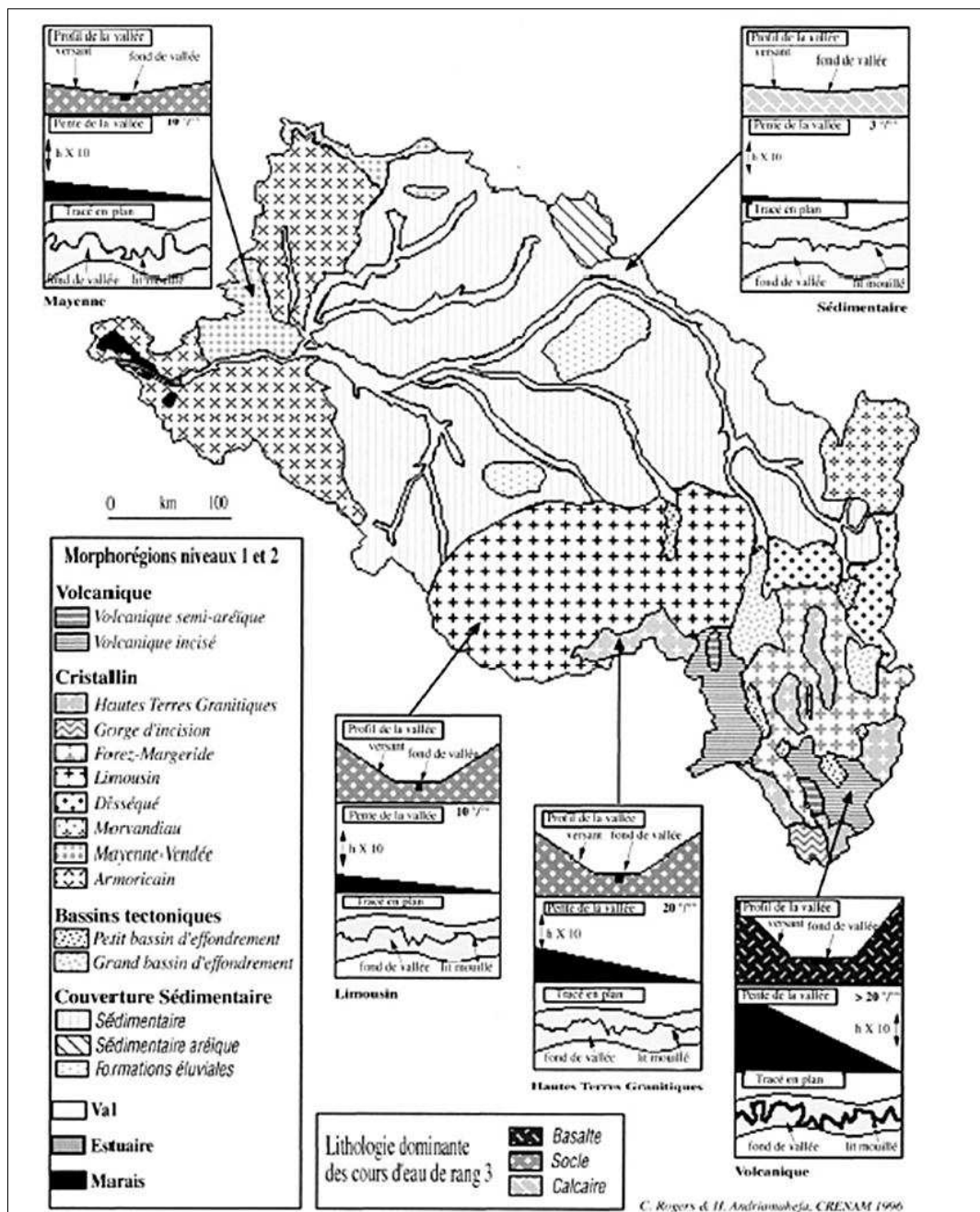


Figure 7. Morpho-régions du bassin de la Loire Les dix-huit mor-phorégions selon Bethemont et Degorce (*in* Wasson et *al.*, 1993) figurent en légende suivant le regroupement préconisé en sept régions majeures.

Le tracé actuel de la Loire est très récent par rapport à l'histoire géologique de la région. La formation du sous-sol du bassin de la Loire date de plus de 500 Ma. Au cours de cette longue période le substratum a connu plusieurs changements du fait des changements climatiques, de l'eustatisme et de la tectonique (Tricart, 1947 ; Schumm, 1986). Au Miocène supérieur, une paléo-Loire s'écoulait en suivant l'axe Loire-seine-Manche. Le fleuve déposé alors les sable de Lozère au niveau de l'Essonne, des incertitudes subsistes

toujours sur l'âge de ces dépôts (Nehlig, 2010). Après leur séparation, les bassins de Loire et de la Seine ont évolué de façon différente. D'un point de vue topographique, l'encaissement des deux fleuves dans leurs vallées est inégal. Dans les plateaux du Bassin parisien, le cours de la Seine est plus encaissé que celui de la Loire. Selon Dion (1934), l'étiage de la Loire à Orléans se situe 63 m au-dessus de celui de la Seine à Paris, alors que les deux fleuves sont à environ la même distance de la mer (372 km pour la Loire et 365 km pour la Seine). L'encaissement de la Loire ne dépasse pas 60 m, alors que celui de la Seine excède 120 m (fig. 1). Dion explique cette différence par des apports de charge solide plus importants sur la Loire ayant ralenti l'encaissement du fleuve.

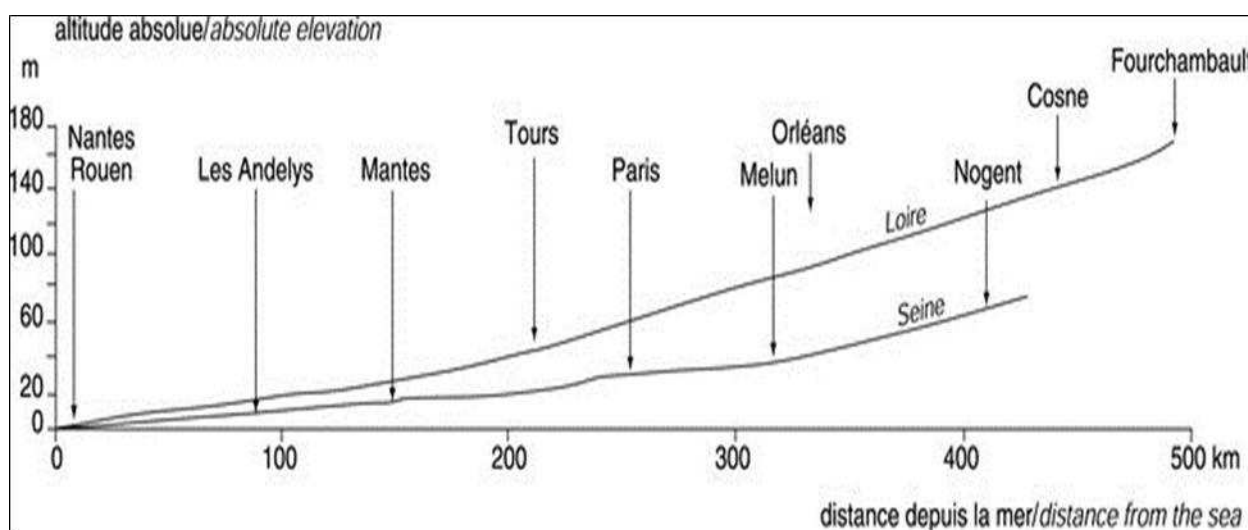


Figure 8. Profils longitudinaux comparés de la Seine et de la Loire (d'après Dion, 1934).

1.2.1 La largeur de la plaine et l'épaisseur des alluvions dans la Loire moyenne

Dans le cours moyen de la Loire, la plaine alluviale se caractérise par des largeurs variables, soit une largeur moyenne d'une valeur allant de 2 à 4 km. On note aussi des rétrécissements de la plaine au niveau Bonny et Ouzouer-sur-Loire et un élargissement relativement important du val en amont d'Orléans et en aval de Candes Saint-Martin (6 à 8 km). Selon Champion et al., (1971), ces variations de largeur n'ont apparemment pas de relation directe avec les formations géologiques rencontrées.

Les sites ateliers de La Charité-sur-Loire et de Mesves se situent au sein d'un tronçon du fleuve caractérisé par une largeur de la plaine alluviale dont les valeurs sont respectivement 2 et 4 km. A Guilly, la Loire traverse une plaine alluvial large, soit environ

6 km. La largeur de plaine alluviale peut avoir une influence considérable sur la propagation des crues d'inondation. Un val large comme celui du site de Guilly est susceptible de réduire l'impact des crues à Orléans et Tours.

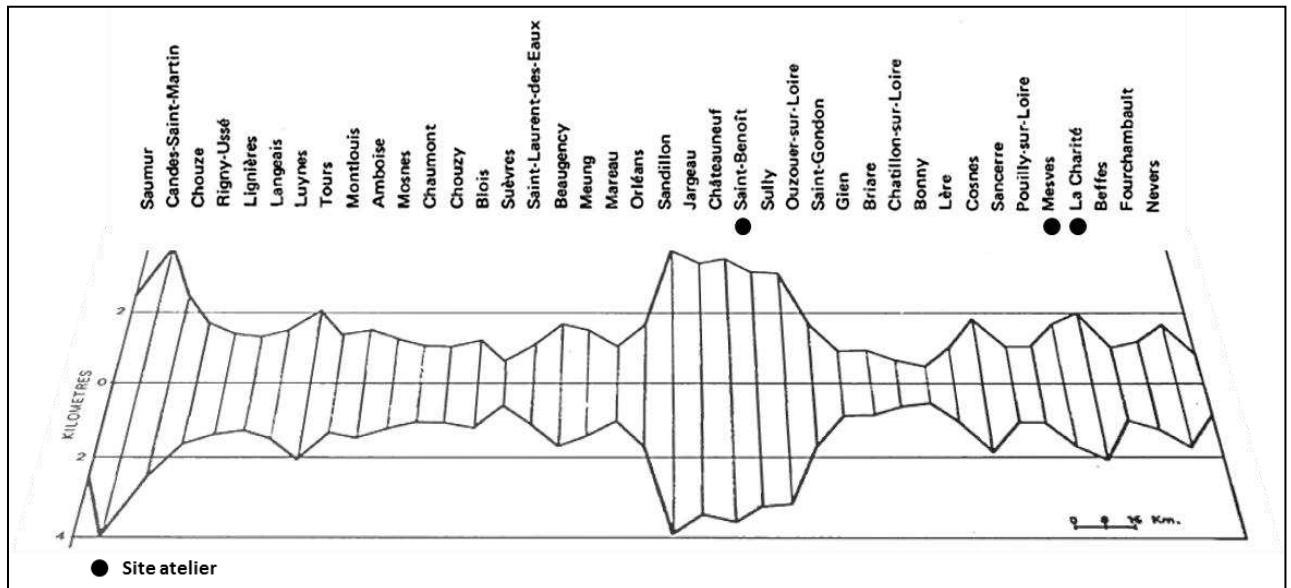


Figure 9. Largeur du val entre Nevers et Saumur (Loire moyenne) d'après Champion et *al.*, 1971(modifiée).

Les sondages réalisés par **Champion et al.**, (1971) dans le val ont permis de fournir des informations concernant la nature et l'épaisseur des alluvions. Ces auteurs mettent en évidence une continuité de qualité, d'amont en aval, les sédiments sont disposés dans le même ordre le long du val étudié, soit une disposition générale verticale de haut en bas : les limons sableux (découverte), les sables, les graves sableuses et le substratum. Cette disposition peut être considérée comme représentative sur l'ensemble du val. L'épaisseur des limons varie de 1 à 2 m le long du tronçon étudié. L'épaisseur des alluvions sabla-graveleuses varie entre 5,5 m (en amont Saint-Laurent-des-Eaux) et 2,7 m (en aval Saint-Laurent-des-Eaux).

Les épaisseurs globales d'alluvions varient entre 4 et 6 m. les valeurs les plus importantes sont enregistrées au niveau de Cosnes et Beaugency, soit un approfondissement d'une valeur d'environ 9 m. l'épaisseur des alluvions diminue entre Chaumont et Amboise, la valeur relevée dans ce secteur est de 3 m. nos sites d'étude se situent dans un secteur où l'épaisseur des dépôts alluvionnaires varie entre : 8 m (à La Charité-sur-Loire), 7 m (Mesves) et 6 m (à Guilly).

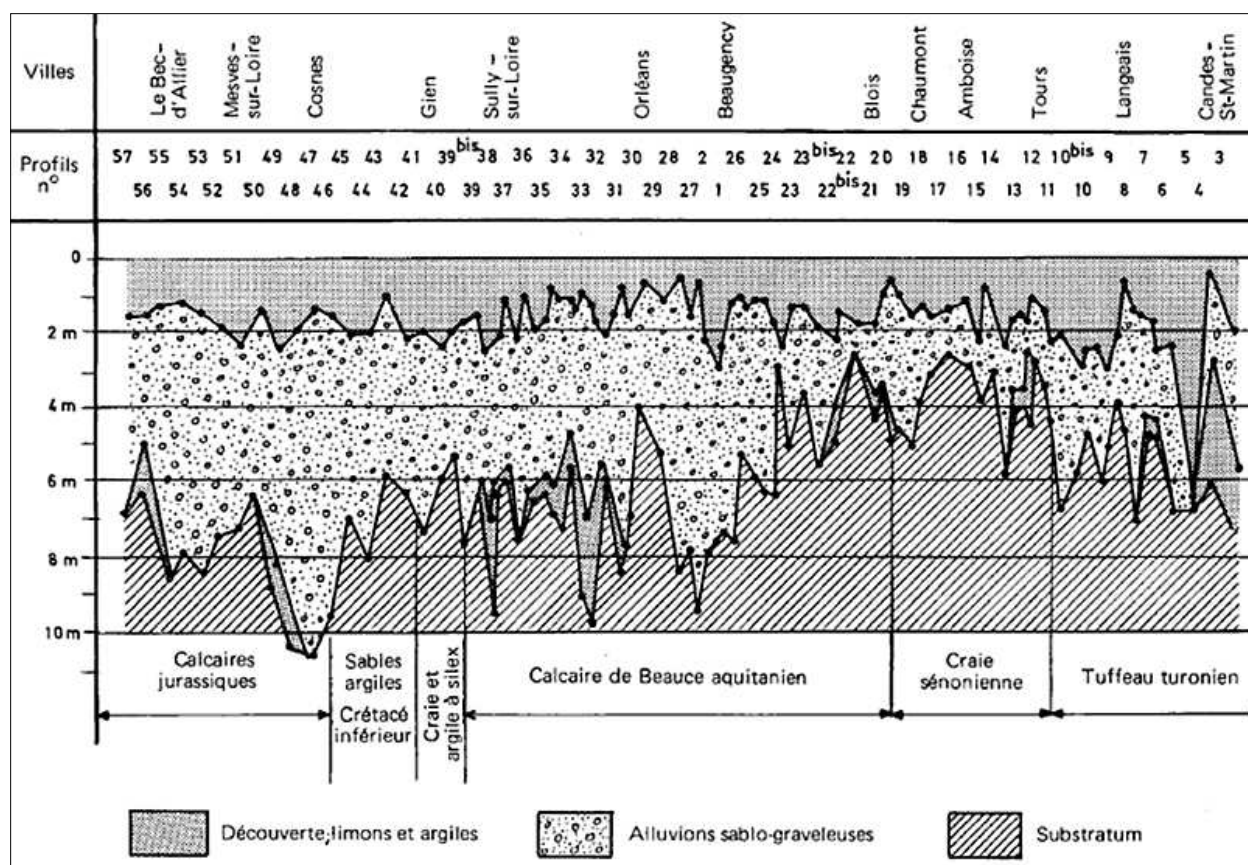


Figure 10. Variation longitudinale de l'épaisseur des alluvions en Loire moyenne entre le Bec d'Allier et Candes Saint-Martin

1.3 L'influence climatique sur le bassin versant de la Loire

Les apports hydrologiques commandent le régime fluvial.

Le bassin de la Loire est soumis à l'influence climatique de la Méditerranée et de l'Atlantique. La première concerne les hauts bassins de la Loire et la seconde s'étale sur la partie basse du fleuve (plaine). Les phénomènes locaux connus sur les hauts bassins de la Loire sont les pluies dites « cévenoles ». Ces pluies trouvent leur origine dans le bassin méditerranéen. Elles se produisent généralement en automne. Les précipitations sont intenses et orageuses, elles sont susceptibles de générer des crues extrêmement violentes et brève sur des petits bassins versants. Ces crues peuvent apporter en 24 heures l'équivalent de $\frac{1}{4}$ du total annuel moyen. La dernière grande crue de ce type a été celle du 20 septembre 1980 et décembre 2003. Les précipitations ont dépassé localement 600 mm, et à Brives-Charensac (Département de la Haute-Loire) la crue a atteint 2 000 m³/s avec une vitesse de montée très rapide de 6 cm par minute. Une telle crue, sans apport océanique,

s'amortit très rapidement et ne présente pas de caractère catastrophique dans le secteur de la Loire Moyenne.

Le climat océanique qui caractérise l'essentiel du bassin versant, présente des hivers doux et pluvieux, et des étés frais et relativement humides, le maximum de précipitations se produit durant la saison froide. Les crues océaniques sont engendrées par de longues périodes pluvieuses, s'étendant sur la presque totalité du bassin, mais souvent à l'exception de la partie la plus haute. Elles surviennent en général en saison froide ; les épisodes les plus notables sont 1907, 1977, 1982, 1994, 1995. Les couvertures de neige sur les hautes terres du Massif Central peuvent retarder la signature hydrologique des événements pluviométriques d'hiver. Une partie des hautes eaux de printemps sont provoquées par les épisodes de fonte de neige. Parfois, une seule perturbation océanique, peut engendrer une crue catastrophique dans les sous-bassins tels que la Vienne, le Cher, l'Indre, la Maine, la Sarthe ou le Loir. Toutefois, si ces précipitations se répètent à quelques jours d'intervalle, la concomitance de la crue de la Loire avec les apports de ses affluents, peut engendrer une crue dangereuse en Basse Loire, comme en décembre 1982.

Les crues issues de la concomitance des crues cévenoles et océanique sont les plus dangereuses. Elles sont connues sous le nom de crues « mixtes ». Les dommages causés par ces événements catastrophiques concernent tout le cours de la Loire et tout particulièrement en Loire Moyenne. Elles sont issues de la composition, à des degrés divers, des deux crues précédemment présentées. A cette catégories de crues appartiennent les trois grandes crues du XIX^{ème} siècle, celles de 1846, 1856 et 1866, au cours desquelles les débits en aval du confluent de l'Allier dépassé 7000 m³/s. Depuis le début du XVI^e siècle on dénombre 17 de ces crues catastrophiques sur la Loire Moyenne, soit 3 à 4 par siècle en moyenne. De nombreuses maisons anciennes et ouvrages d'art comportent des repères de crue sur leur mur.

1.3.1 Un régime hydrologique complexe

Le régime hydrologique du fleuve est étroitement lié aux : influences climatiques qui conditionnent les précipitations, à la nature lithologique du bassin versant (la perméabilité

des roches) et à l'apport des affluents. La Loire a un régime hydrologique très irrégulier de type pluvio-nival (marqué par une influence océanique). Ce régime est caractérisé par une alimentation en eau due aux pluies (généralement de saison froide) et de l'eau provenant, au printemps, de la fonte des neiges tombées sur les hauteurs du bassin versant.

Dans sa partie supérieure, la Loire s'écoule sur des terrains imperméables du Massif Central. Elle est alimentée par la fonte des neiges et par les averses cévenoles d'automne qui tombent sur les hauts versants de l'amont. En raison des fortes pentes et de l'imperméabilité des roches la concentration des eaux fait de la Loire un véritable torrent de montagne. Au niveau de sa confluence avec l'Allier (au Bec d'Allier) et selon **Dachrry, (1974)**, en dehors des périodes de crue le flux liquide introduit dans la Loire en provenance de l'Allier peut être supérieur au débit de la Loire tel est le cas en 1959. De manière générale, les proportions de débit de la Loire et de l'Allier sont respectivement 56% et 44% (**Pardé, 1964 ; Dacharry, 1974**). (Voir figure)

Dans le Bassin parisien (Loire moyenne), les caractéristiques hydrologiques et lithologiques changent, le fleuve draine un substratum en grande partie perméable et ne reçoit aucun affluent important sur environ 300 km depuis le bec d'Allier jusqu'à Tours où on enregistre un module brute de $370 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A l'aval de Tours, la Loire reçoit sur sa rive gauche les eaux du Cher, Indre et Vienne. Cette dernière apporte à la Loire un module brut de $215 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (**Brossé, 1982**). Sur sa rive droite, la Loire reçoit les eaux du Massif armoricain (Loir, Sarthe et Mayenne) qui se rejoignent pour former la Maine avant de se jeter dans la Loire. L'alimentation de la Maine est largement due aux pluies d'hiver (régime pluviale).

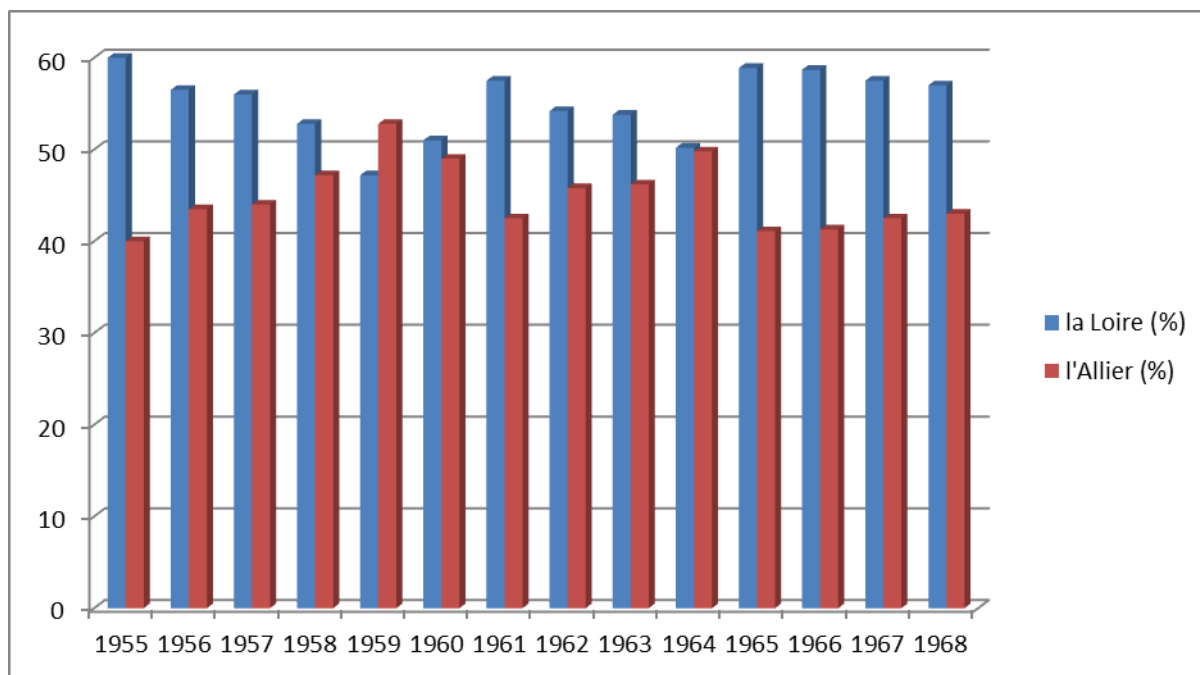


Figure 11. Parts respectives de la Loire et de l'Allier dans le débit moyen annuel au bec d'Allier, de 1955 à 1968 (source : Dacharry 1974) montrant la double fluctuation des débits annuels.

Les fluctuations des débits

Les débits moyens mensuels de la Loire sont très variables d'une année à l'autre et présentent un double aspect de l'irrégularité, autrement dit, cette variabilité se manifeste de deux façons : une variation des dates d'occurrence des maxima et des minima annuels d'une année à l'autre et l'irrégularité des débits moyens d'un même mois. Les moyennes mensuelles maximales surviennent à n'importe quel mois de la saison froide, il en va de même pour les moyennes mensuelles minimales de la saison chaude.

Ce régime traduit la grande irrégularité des pluies sur le bassin versant (**Dacharry, 1974**). La fluctuation des débits est plus prononcée en période des hautes eaux lors de la saison froide que pendant les basses eaux de la saison chaude. Cette dernière s'étale sur environ cinq mois contre sept à neuf pour la saison froide (**Dacharry, 1974**). Le régime du fleuve présente aussi un contraste important entre les débits maximaux et minimaux. Les fortes crues peuvent atteindre un débit supérieur à $7000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (crues de 1846, 1856, 1866) et des étiages sévères comme celui de 1949, l'année de référence du XX^{ème} siècle, où il ne passait que $11 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à Gien. Depuis la construction du barrage de Villerest, dans le

Département de la Loire sur la Loire et à Naussac, dans le Département de la Lozère, sur un affluent de l'Allier, la Loire ne connaît plus de basses eaux de cette valeur. Ils permettent le maintenir un débit minimum de l'ordre de $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Les basses eaux se placent le plus souvent le mois d'août. Quant au maximum annuel (crue), il se produit en hiver et au printemps. Les rapports des débits moyens entre les mois d'étiages et les mois de crue sont de l'ordre de 6 à 7.

La Loire est un fleuve moyennement abondant. La lame d'eau écoulee dans son bassin versant est de 306 mm annuellement, ce qui est quelque peu inférieur à la moyenne d'ensemble de la France (plus ou moins 320 millimètres). Le débit spécifique atteint de ce fait le chiffre modéré de $9,7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ de bassin (Banque HYDRO).

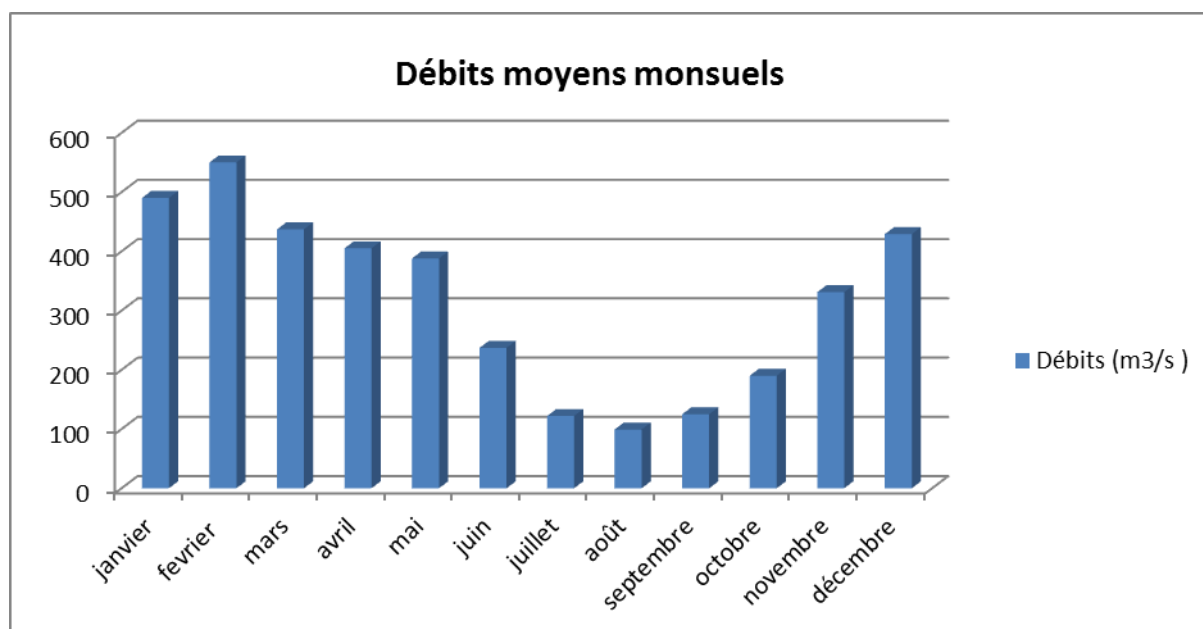


Figure 12. Débits mensuels calculés sur 45 ans (1967 - 2011) à la station de Givry.

Le débit spécifique annuel est de $9,7 \text{ l/s/m}^2$. Quant à la lame d'eau annuelle, elle est de 306 mm (Source : banque HYDRO).

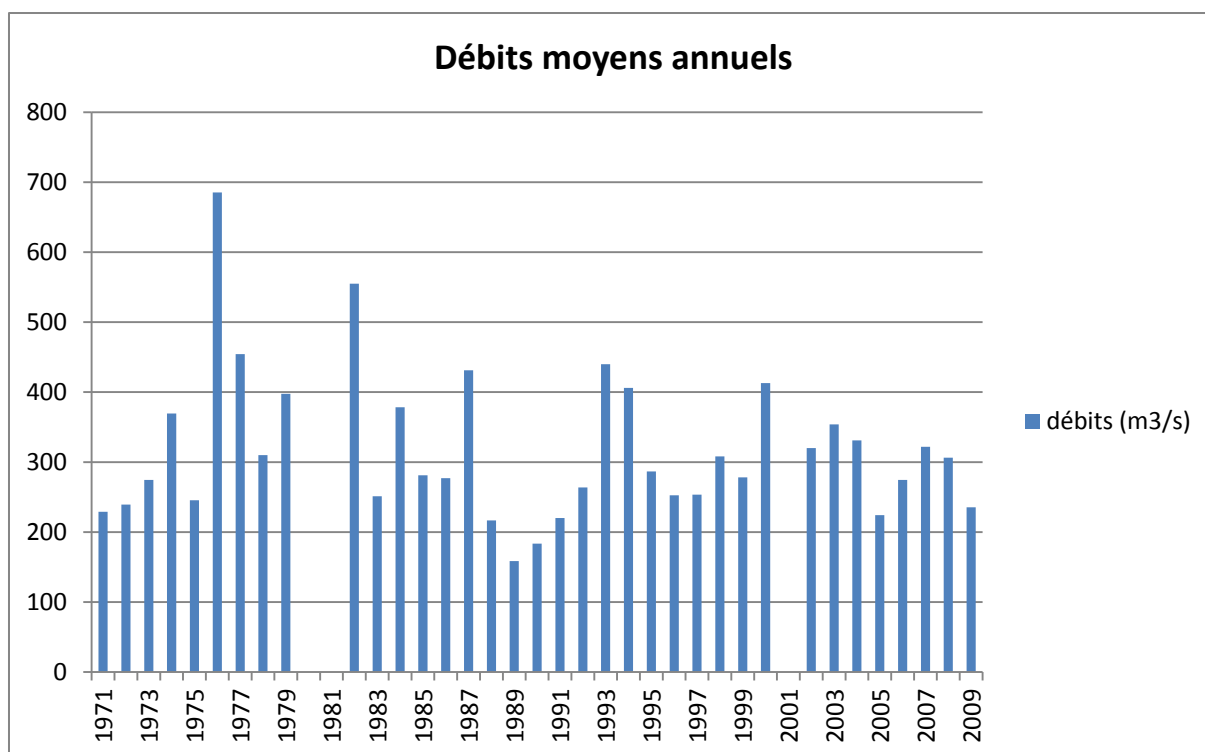


Figure 13. Variabilité inter-annuelle du régime hydrologique de la Loire entre 1971 et 2009. (Station de Givry).

Les relevés de 1981 et 2001 sont incomplets et ne figurent pas sur les données de la banque hydro.

Rappel sur l'évolution du lit de la Loire

Insertion du présent travail de recherche dans des programmes scientifiques et son apport aux études réalisés sur la Loire

2.1 La politique de mise en valeur et de gestion du lit de la Loire

La Loire n'a pas connu de plan global d'aménagement ni de grands programmes de recherches interdisciplinaires jusqu'au milieu des années 1990, avec la mise en place du programme **Life Loire Nature** en 1993. Cela en vue de gérer des terrains pour préserver «l'espace de liberté» de la Loire à travers la reconquête des espaces naturels d'inondation et de divagation du fleuve. La question des richesses faunistiques et floristiques de la Loire a fait l'objet d'un débat conflictuel engagé par les associations de protection de la nature (regroupées dans le comité Loire Vivante) s'opposant au programme d'aménagement de la Loire et de ses affluents mis en œuvre par l'**EPALA** (construction de barrages). Ce débat a

abouti à la mise en place en 1994 d'un plan d'aménagement et d'action globale réalisé à l'échelle du bassin versant : **Plan Loire Grandeur Nature**.

Le plan Loire Grandeur Nature a connu deux phases 1994-2000 et 2000-2006. Aujourd'hui on est en cours de la troisième phase du programme 2007-2013 qui repose sur un contrat de projet inter-régional (CPIER) signé entre l'État, l'Etablissement Public Loire, l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et les Régions : Rhône-Alpes, Auvergne, Bourgogne, Centre, Languedoc-Roussillon, Limousin, Pays de la Loire, Basse-Normandie, Poitou-Charentes.

Le Plan Loire bénéficie également d'un financement par un programme opérationnel du Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) adopté par la commission européenne. Les différentes actions du Plan Loire Grandeur Nature s'articulent autour des thèmes suivants :

la sécurité des riverains face aux les risques d'inondation ;

le rehaussement de la ligne d'eau à l'étiage ;

le maintien et la préservation de la diversité biologique ;

l'amélioration de la capacité de l'écoulement au niveau des zones vulnérables (urbanisées).

Ces quatre thèmes sont au cœur de la réflexion de notre travail de recherche. Dans le cadre de la 3^{ème} phase du PLGN s'est mise en place la Plateforme Recherche Données Information (RDI). Notre thèse s'inscrit dans ce cadre et a fait l'objet de subventions par ce biais. Cette Plate-forme permet de coordonner les travaux de recherche, partager les connaissances et diffuser les données et les résultats.

La reconnaissance récente des grandes qualités écologiques des milieux rivulaire ligériens a justifié leurs intégrations dans le **Programme National de Recherche sur les Zones Humides** mis en place en 1998. Les principaux objectifs de ce programme étaient de : définir les caractéristiques écologiques et sociales des zones humides et de proposer des éléments de diagnostic et de suivi. Les résultats de cette recherche sont intégrés dans notre analyse.

Notre travail de recherche fait partie d'un programme national de recherche appelé Zone Atelier du Bassin de Loire (**ZAL**). Ce dernier est piloté par le **CNRS (Inee)**. Les Zones Ateliers ont été créées dans le cadre du Programme transversal Environnement, Vie et

Société (PEVS) en 2001. Elles ont pour objet l'étude, sur un pas de temps long, (depuis 15000 ans) d'un anthroposystème complexe développé sur le bassin versant de la Loire. Une approche pluridisciplinaire associant les Sciences de la Vie, les Science Humaines et de la Société et les Sciences de la Terre. Ce programme doit fournir des éléments permettant de comprendre le fonctionnement de cet espace. La présente thèse se voit engagée dans cette optique.

2.2 Les résultats des principaux travaux de recherches menés sur la Loire

Le forçage anthropique, *l'impact des aménagements réalisés dans le fleuve*

Réputée pour son hydrologie « capricieuse » et pour son caractère imprévisible, la Loire est moins aménagée, mais aussi moins connue que d'autres grands fleuves français (le Rhône, la Seine, le Rhin). Ce manque d'informations relatives au fonctionnement de l'hydrosystème ligérien peut parfois poser des problèmes de gestion suite aux modifications apportées par les sociétés antérieures. La Loire, n'a pas été épargnée par les aménagements : levées, barrages, épis et ponts. Le forçage anthropique conduisant à la « chenalisation » est probablement moins important que d'autres grands fleuves français en raison de la situation géographique marginale de la Loire par rapport aux principaux axes économiques du XX^{ème} siècle. Cela explique en partie le nombre réduit de grands barrages régulateurs de débit du fleuve (Bethemont et al., 1993 ; Gautier et Bazin, 1996). Cependant, la dynamique fluviale est fortement altérée par différents aménagements qui se sont succédé depuis le 9^{ème} siècle. L'espace fluvial ligérien a connu une croissance démographique au cours du deuxième millénaire (apparition d'agglomérations tous les 25 km) (Burnouf et Carcaud, 2000 ; Garcin et al., 2006). L'impact de cette urbanisation est de deux types :

Un impact direct sur l'environnement fluvial suite à l'édification des digues, pont et ouvrages de navigation : le rapport entre les sociétés riveraines et le fleuve s'est modifié de façon progressive, les ouvrages conçus entre le 9^{ème} et le 11^{ème} siècle étaient temporaires, discontinus et submersibles. A partir du 15^{ème} siècle, on passe à la mise en œuvre d'aménagements continus et « insubmersibles » afin de protéger durablement les activités

et les infrastructures contre les inondations. Ces activités pèsent sur les processus morphodynamiques actuels du fleuve (réduction de la mobilité latérale du cours d'eau)

Un impact indirect, concerne tous les effets induits par la croissance des besoins des sociétés urbaines : les mutations de l'usage du sol de la plaine et du chenal et transformations des activités agricoles à l'échelle du bassin versant provoquant :

- une perturbation du transit sédimentaire à travers l'isolement de la plaine alluviale,
- la croissance des besoins en eau potable et pour l'irrigation,
- L'augmentation de la vulnérabilité face au risque d'inondation.

Ces constats mettent en évidence le rôle déterminant du forçage anthropique au cours du Moyen Âge. Les vals de la Loire moyenne et océanique sont en grande partie isolés du fleuve du fait de la présence des levées insubmersibles. Ces vals s'étendent sur des surfaces importantes (le val d'Orléans : environ 300 km², 8 km de large. le Val d'Authion : environ 470 km², 10 km de large) (**Garcin et al., 2006**). La présence des digues et la longue période de calme hydrologique (l'absence de grandes crues depuis plus d'un siècle) créent un sentiment de sécurité favorisant l'urbanisation des vals. Environ 400 000 personnes sont installées en zones inondables. A titre d'exemple, une crue centennale entre le bec d'Allier et le bec de Maine touchera 290000 riverains et 115000 logements, elle concernera directement 70000 emplois et désorganisera les réseaux : eau, électricité et transport. Selon le rapport public de la Cour de Comptes de 1999, en cas de grande crue, les dégâts ont été estimés à 6 milliards d'euros.

Tableau 3. L'endiguement du lit de la Loire depuis le Bec d'Allier à l'estuaire (d'après Babonaux, 1970)

Tronçon de la Loire	Distance (km)	Longueur des digues (km)	Superficie du val aménagé (km ²)
Allier-Briare	90	49	5906
Briare-confluence avec le Cher	217	261	44257
Cher – pont de Cé	90	133	39488
Pont de Cé- Nantes	90	41	5946
Allier – Nantes	487	484	95637

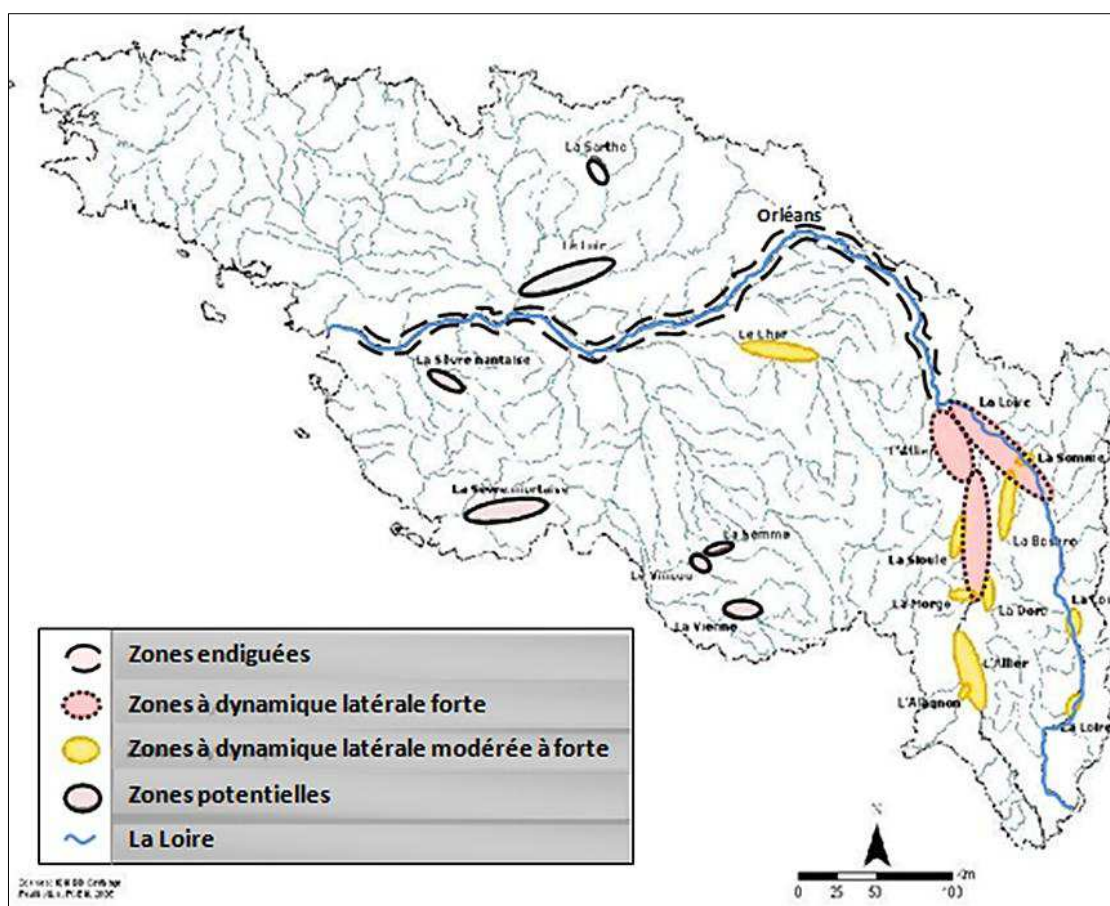


Figure 14. Mise en relation de la dynamique latérale du fleuve et de l'emplacement des levées.

Les levées réduisent considérablement l'espace de liberté du cours d'eau (Source : PLGN, espace de mobilité des cours d'eau 2010, modifiée).

D'autres aménagements ont vu le jour durant la deuxième moitié du XX^{ème} siècle. Il s'agit des barrages réalisés pour : répondre aux besoins des populations (en eau et énergie) et

assurer le refroidissement des quatre centrales électronucléaires installées sur le long du cours d'eau (Belleville, Dampierre, Saint-Laurent et Chinon) (figure n°7). La protection nécessaire des centrales s'appuie sur des seuils transversaux importants. Les risques liés à ces d'aménagements sont nombreux : pollution des eaux, déficit sédimentaire et réduction de la biodiversité. Par ailleurs, la question du rôle protecteur des barrages face aux crues est à discuter. A titre d'exemple sur la Loire, les ouvrages de **Villerest** et **le Veudre** (en projet) auraient pu écrêter 230 millions de m³ alors qu'une crue équivalente à celle de 1856 peut écouler environ 1,5 à 2,5 milliards de m³. L'efficacité de ces dispositifs est donc très modeste.

Du point de vue géomorphologique, les grands barrages influencent le style fluvial (modification des débits liquides et de la charge solide). Selon le résultat d'une étude portant sur les effets des grands barrages sur la Platte River (USA), deux transformations principales sont constatées : le passage du style en tresse au chenal unique et le développement de la végétation, dû à la suppression des crues (**Simon *in* Shumm 1994**) les mêmes tendances de mutations des formes fluviales (chenalisation et développement de la végétation) sont constatées sur la Loire. Le lien de cause à effet direct entre les aménagements et les métamorphoses fluviales est loin d'être clair. Les causes de la métamorphose des lits fluviaux sont multiples et les interactions entre les différents facteurs exerçants un contrôle sur les processus morphodynamique au sein de l'hydrosystème sont complexe.

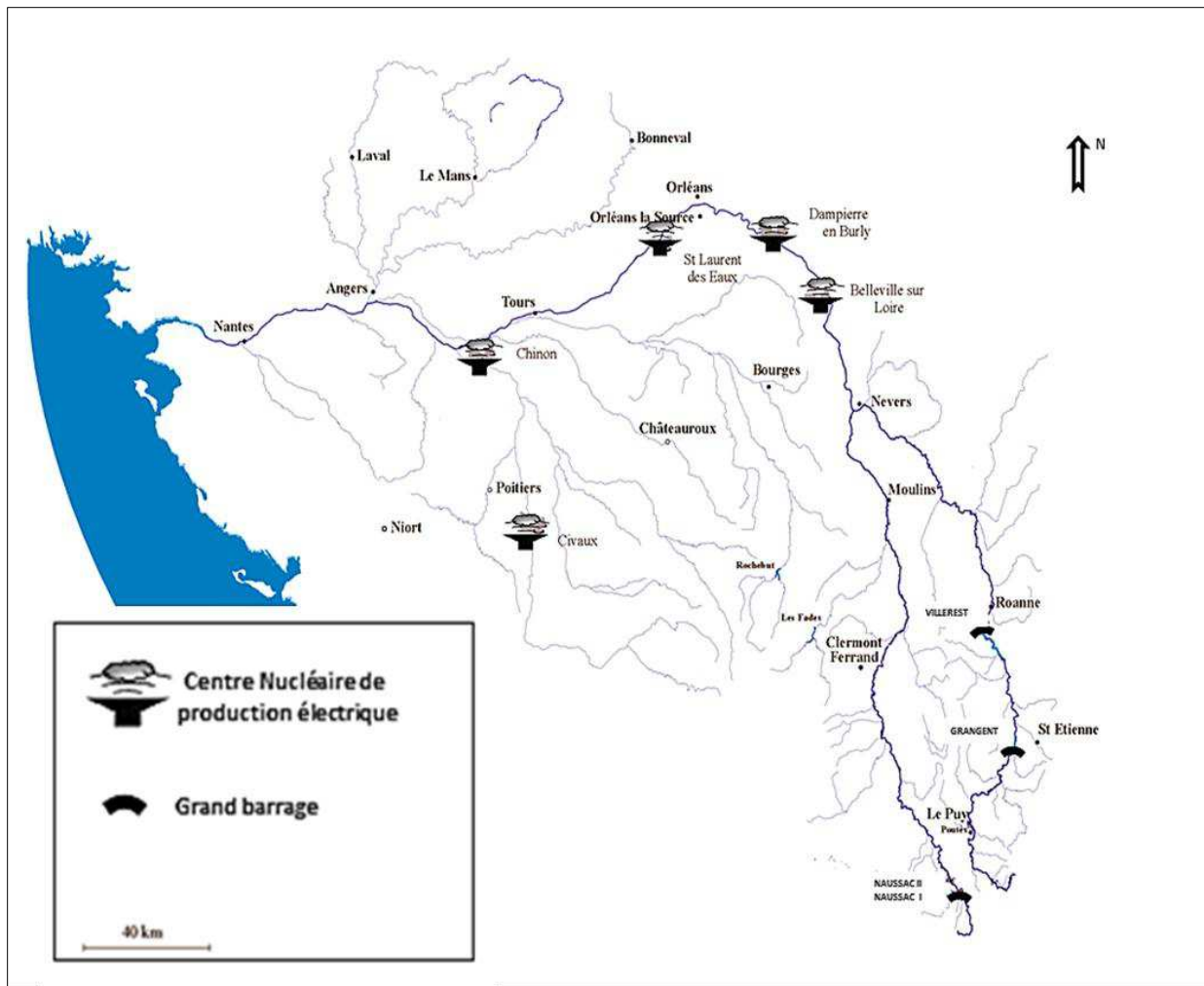


Figure 15. Emplacement des centrales nucléaires et des grands barrages dans le bassin de la Loire.

*Ces ouvrages influencent les modalités du transport solide et liquide et la qualité des eaux.
(Source : Etablissement Public Loire, étude morphologique des fleuves et grandes rivières de France, décembre 2003, modifiée)*

Le réajustement des formes fluviales

La dynamique fluviale actuelle du cours de la Loire est caractérisé par :

Une rétraction considérable de la bande active

Depuis environ une soixantaine d'années, le cours moyen de la Loire connaît une importante métamorphose des formes fluviales. Cette évolution est caractérisée par une rétraction considérable de la bande active au profit des îles et des marges latérale du fleuve (franc- bord). Cela est dû au ralentissement de l'activité du fleuve avec pour conséquence

une tendance à la fermeture de l'espace fluvial par développement de la végétation. Il en résulte une rupture de la continuité sédimentaire accompagnée de phénomène de dépôts de sédiments au sein des îles et des bras secondaires. Les alluvions piégées dans ces unités fluviales favorisent leurs exhaussements par rapport au chenal principal. Cela conduit à un déséquilibre dans le transit de la charge solide entre le bras principal et ces unités en cours de sédimentation (réduction de la capacité de transport). Les études effectuées sur la partie médiane de la Loire au niveau de la réserve naturelle du val de Loire (**Nabet, 2005 et 2006 ; Grivel, 2008**) ou sur le site du Bec d'Allier dans le cadre du PNRZH montrent que la dynamique fluviale tend vers une diminution de la section mouillée en faveur des espaces végétalisés qui se développent à une vitesse considérable. L'invasion végétale a été favorisée par la déprise agropastorale (**Gautier et al., 1999 ; Gautier et al., 2001 ; Gautier et Grivel, 2003 et 2006**). L'essentiel de la réduction de la bande active s'est produit au cours de la 1^{ère} moitié du 20^{ème} siècle (**Grivel, 2008**) nous citons à titre d'exemple quelques résultats concernant l'évolution des formes fluviales et du couvert végétal au sein du site de la RNVL. :

- La Période 1850 – 1960 : caractérisée par une rétraction considérable de la bande active, soit des diminutions moyennes de 320 m et des maxima de 700 m, soit une réduction de 56,49 % en l'espace de 110 ans.
- La Période 1960 -1995 : Le même scénario se répète durant cette période : une réduction de la bande active qui perd annuellement environ 4 ha.
- L'évolution des formes fluviales pour la période allant de 1995 à 2002 est caractérisée par une diminution des surfaces occupées par les îles au profit des marges latérales du fleuve (voir figure). Cela s'explique par le rattachement des îles au franc-bord à travers le colmatage et la fermeture de certains bras secondaires (**Grivel, 2008**). Il en résulte de cette évolution une réduction considérable la section mouillée et une augmentation de la capacité de transport au sein du chenal principal. Cet exemple met en évidence le rôle morphogène du couvert végétal. La végétation exerce un contrôle sur la distribution spatiale du cortège sédimentaire créant localement un déficit de la charge solide au sein du

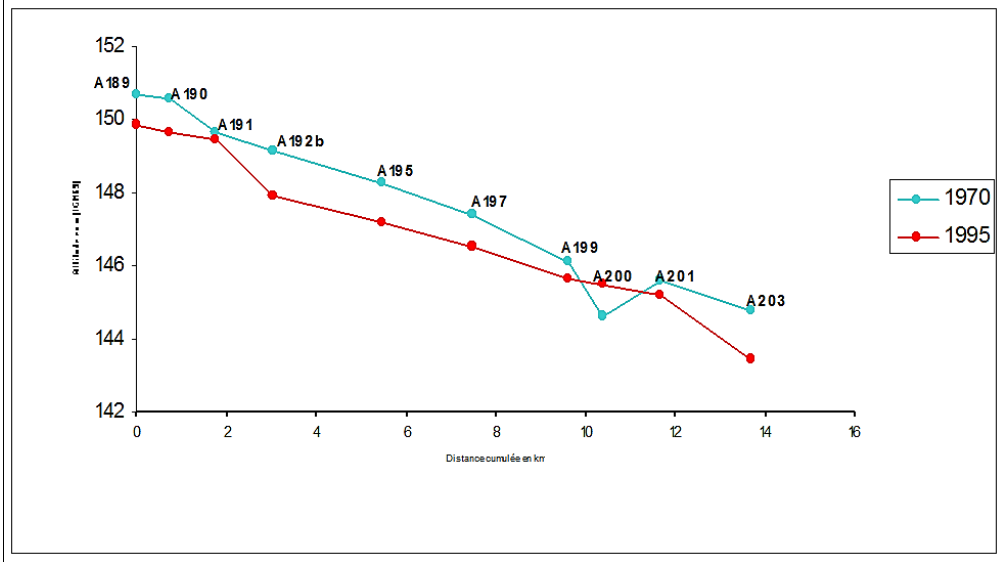
lit vif. L'évolution du couvert végétal du stade végétatif à dominante herbacé au stade végétatif principalement dominé par la forêt à bois durs atteste la stabilité de ces formes.

Une tendance à l'incision du plancher alluvial

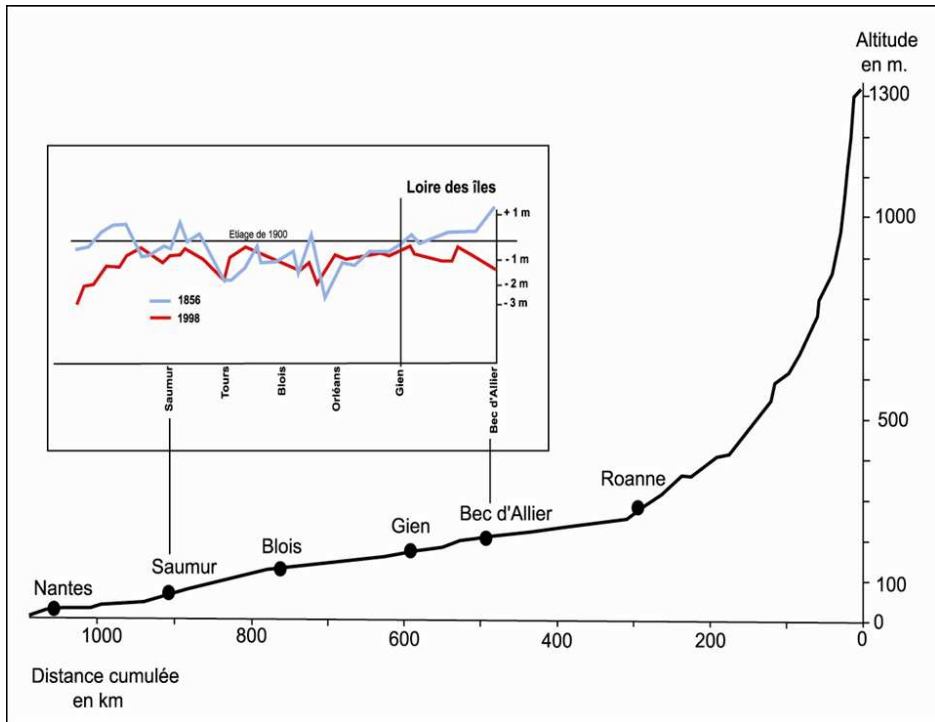
L'incision du plancher alluvial est un phénomène répandu sur tout le linéaire de la Loire. L'enfoncement du lit était déjà amorcé dès la première moitié du 20^{ème} siècle (**Grivel 2008**). Les premiers indices de cette incision ont été relevés par les ingénieurs du 19^{ème} siècle. 41 point durs (roches) ont été relevés par Comoy entre Briare et Nantes, ces seuils durs n'ont jamais été recouverts de sable (**Brossé 1982**). A l'aval du Bec d'Allier, l'incision du lit est évaluée pour la période allant de 1860 à 1988 à : 1,50 m à Orléans, 2 m à Tours et 3 m à d'Ancenis (**Gazowski 1994**). De 1986 à 1996, **Chapuis (1997)**, enregistre une vitesse d'enfoncement de la ligne d'eau d'étiage variant de 1,8 cm/an, entre Saint-Benoît sur-Loire et Mareau, en aval d'Orléans et à 10 cm/an, de Saint-Ay à Amboise (**Larue 2004**).

Sur le secteur de la Réserve Naturelle du Val de Loire (voir figure n°12), la reconstitution des profils en long réalisés à partir des profils en travers dressés en 1970 et 1995 met en évidence une incision du chenal principal sur une quinzaine de kilomètres. Cette enfoncement est de l'ordre de 0,20 à 1,3 m en 25 ans, soit une moyenne de 0,75 m et un rythme de 0,03 m/an (**Gautier et Grivel 2006**). D'un point de vue géomorphologique, l'abaissement du plancher alluvial favorise les processus de sédimentation au sein des îles et des bras secondaires. L'augmentation des valeurs des débits de connexion de ces unités fluviales induit une réduction des durées de submersions et favorise le développement de la végétation. Le couvert végétal accélère les processus de sédimentation aux seins des bras secondaires et des îles. La réduction des durées de submersion des chenaux secondaires associée au développement rapide de la végétation conduit à la perturbation du flux sédimentaire en créant des zones préférentielles de sédimentation que sont les îles et les bras secondaires. Quant au flux liquide, il se concentre essentiellement dans le chenal principal augmentant ainsi sa capacité de transport. Cela constitue un risque potentiel de déstabilisation des ouvrages (pont, digue). En cas de crue le débordement peut être rapide du fait de la réduction de la section mouillée et aussi l'encombrement du lit par la végétation. La tendance de l'incision du lit de la Loire est une réponse du fleuve à la

152



Altitude en m

[illegible]

2.3 Les principaux facteurs de la métamorphose du système fluvial ligérien

L'action anthropique est un élément récent à l'échelle de la vie du fleuve. Elle est introduite dans l'hydrosystème et influence son fonctionnement à long terme. Les raisons des profondes mutations de la dynamique fluviale sont complexes du fait de la variation spatio-temporelle des actions humaines : depuis le début du 19^{ème} siècle se sont succédés de nouveaux endiguement, des barrages, la reforestation des bassins amont qui ont entraîné une stabilisation des formes (Gautier et Bazin 1996, Gautier et al 2001, Garcin et al 2006, Grivel 2008). Les chercheurs ayant travaillé sur ces questions expliquent la métamorphose du paysage ligérien par une conjugaison de plusieurs acteurs d'ordre naturel et socio-économique. Ils placent comme éléments importants :

- *Le déclin de la navigation (l'arrêt de l'entretien du lit)*, la Loire fut une importante artère de communication durant des siècles (voir figure n°14). Elle assurait la liaison des provinces avoisinantes, le sud du bassin parisien, l'océan Atlantique, l'axe rhodanien et les débouchés vers l'Afrique et les Amériques. Au XV^{ème} siècle c'est la plus importante voie de communication du royaume (ref). En 1642, l'ouverture du canal de Briare, puis en 1692 de celui d'Orléans, mettent en liaison directe la Loire et la Seine, favorisant encore plus les échanges commerciaux et le développement de professions comme celle de marinier. Entre 1846 et 1852 le chemin de fer est prolongé d'Orléans jusqu'à Nantes. Progressivement le train mit fin aux activités liées à la navigation. Il en résulte un arrêt de l'entretien du lit (enlèvement d'embâcles, nettoyage, entretien des ouvrages...), ce qui favorise le développement de la végétation au sein du lit vif (Grivel 2008).

- *L'abandon des activités agricoles (agropastorales)*, la seconde moitié du XX^{ème} siècle est marquée par une déprise agricole au sein du lit de la Loire (Gautier et al 2001 ; 2007). Une grande partie des terres autrefois cultivées et pâturées est progressivement abandonnée par les riverains, excepté dans le département de la Saône et Loire où l'élevage Charolais est maintenu. Le pâturage et la fauche des prairies inondables sont remplacés parfois par des plantations de peuplier ou par une colonisation végétale spontanée. La populiculture est à l'origine d'une diminution de la biodiversité : disparition d'espèces protégées ou d'intérêt patrimoniale et diminution de nombreux types de communautés végétales (Cornier 1997,

1999). Par ailleurs, le développement de la végétation dans le lit mineur favorise la fixation des formes fluviales (île, banc et berge). **Hikin (2008)** montre à partir de l'étude de la rivière Squamish en Colombie britannique que la végétation peut exercer un contrôle significatif des phénomènes fluviaux et de la morphologie fluviale à partir de cinq mécanismes de base : la résistance au courant, la solidité des rives, les couches de sédimentation, la formation de barrages de débris végétaux, et les dépôts sur les parties concaves des rives. **Hadly (1961)** et **Graf (1978)**, mettent en évidence des modifications du tracé en plan de cours d'eau dans le sud-ouest des Etats Unis en raison de la progression du *Tamaris* (espèce envahissante). Un autre cas d'étude se rapproche plus du cas de la Loire. Il s'agit de la rivière Turanganni (Nouvelle-Zélande), **Nevin (1969)** montre l'influence des plantations de saules dans les cavités des chenaux actives. Ces plantations ont provoqués une métamorphose fluviale qui consiste en un passage d'un style en tresse à un style à méandre (**Piégay et al, 2003**). Sur la Loire, **Berthois (1959)**, met en évidence la perturbation granulométrique liée à l'installation de la végétation au sein du lit mineur, il note que la granulométrie des sédiments est plus importante dans les zones non abritées par la végétation. Cela montre que la végétation joue un rôle protecteur en réduisant la compétence du flux liquide. L'auteur note aussi l'influence de la végétation sur les paramètres physiques du chenal (topographie et pente). L'abandon des activités agropastorales dans le lit de la Loire a d'une certaine façon favorisé le développement d'une végétation spontanée et la perturbation de la dynamique fluviale.

- *L'extraction massive de granulats (1950 -1990)*, après la seconde guerre mondiale, les lits fluviaux français ont fait l'objet d'extraction massive de granulat afin de répondre aux besoins du pays en matière de construction et de développement économique. La Loire n'a pas échappé à cette exploitation massive de matériaux granulaires jugés de qualité et bon marché. Entre le bec d'Allier et Nantes, 220 million de tonnes de matériaux ont été extraits en une trentaine d'années (**Dambre et Malaval, 1993**). Ces extractions augmentent considérablement le déficit sédimentaire au sein du lit mineur et favorisent le déclenchement rapide des processus d'incision du plancher alluvial. De ce fait, les prélèvements de sédiments sont considérés comme le facteur principal de l'incision du lit

de la Loire (**Dambre et Malaval, 1993, Gasowski 1994, Bazin et Gautier, 1996**). L'effet des extractions sur la dynamique fluviale peut être expliqué en partie par le volume et la fréquence des prélèvements qui dépasse largement l'approvisionnement du fleuve en alluvions. Dans le département de la Nièvre, **Gasowski (1994)** met en évidence une corrélation entre le rythme des extractions de granulats dans le lit mineur de la Loire et la vitesse de l'enfoncement, l'incision du lit atteint un rythme de 4,5 cm/an entre 1866 et 1978, cette date correspond au volume maximal extrait. On passe de 0,5 Mt à 6,4 Mt soit environ 6 fois le volume des alluvions charriés par les crues (1Mt/an) (**Babonaux 1970, Berthois 1972, Maillard 1972**). Le rythme d'enfoncement diminue à 3,3 cm/an de 1978 à 1989. L'effet des extractions de granulat dans le lit mineur est double : une influence directe sur la topographie du chenal principal (abaissement) et une augmentation du différentiel topographique entre chenal principal et bras secondaires. Cela favorise l'expansion du couvert végétal au sein des îles et des bras secondaires et par conséquent la rupture de la continuité sédimentaire au sein de lit mineur.

- *L'absence de grande crue susceptible de régénérer les formes fluviales (depuis 1866)*, Les crues sont des événements hydrologiques susceptibles d'influencer la dynamique fluviale. Elles sont la source du renouvellement des milieux et de la biodiversité. la Loire n'a pas connu de forte crue depuis plus d'un siècle. Selon **Dacharry (1974)**, il y a eu trois crues dépassants les $7000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ enregistrées au milieu du XIX^{ème}, 4 crues ont dépassé 3000 m^3 entre 1934 et 1954 et aucune crue n'a atteint 2000 m^3 entre 1955 et 1966. Le travail de synthèse réalisé par **Gautier et Castanet (2008)** à ce sujet permet de prolonger les données concernant les événements hydrologiques importants de la Loire et confirme par la même occasion la persistance d'une période hydrologique calme. On dénombre en l'espace de 37 ans (1966 et 2003) 3 crues dont le débit dépasse 3000 m^3 et crues supérieures à 2000 m^3 (voir figure n° 15). Un autre événement hydrologique semble être un important facteur dans l'évolution morphodynamique du lit mineur. Il s'agit de la disparition des hautes eaux d'été depuis 1925 (**Gautier et Castanet, 2008**). Cette période correspond aussi à celle du développement rapide de la végétation pionnière (Saules et Peupliers) au sein du lit. En effet, les basses eaux d'été favorisent le développement de la végétation au sein des bras

secondaires et par conséquent la perturbation du transit sédimentaire (piégeage de sédiments). Cette période de l'année est propice au développement de peupliers et des saules qui aujourd'hui progresse à une vitesse considérable au détriment de la bande active (voir figure n°16). L'assouplissement hydrologique qu'a connu la Loire a provoqué un affaiblissement de la dynamique fluviale. Cela favorise le développement de la végétation et la fermeture du système alluvial à travers la rétraction de la bande active (**Gautier et al 2001, Gautier et Grivel 2003, Grivel 2008**). Le phénomène de fermeture du paysage fluvial par envahissement de la ripisylve a été également observé par **Fagot et al (1989)** sur l'Ain, les auteurs attribuent cette métamorphose récente (1954-1983) à des modifications de régime des débits.

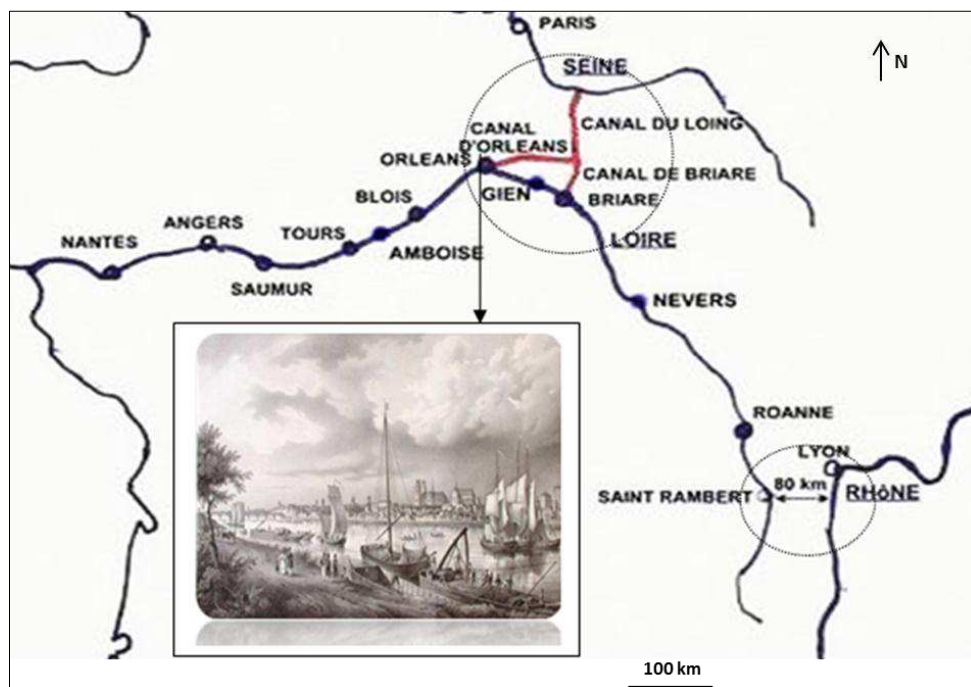


Figure 18. La Loire un important axe de communication et d'échanges commerciaux. Des canaux assurent la connexion de la Loire avec le Rhône et la Seine.

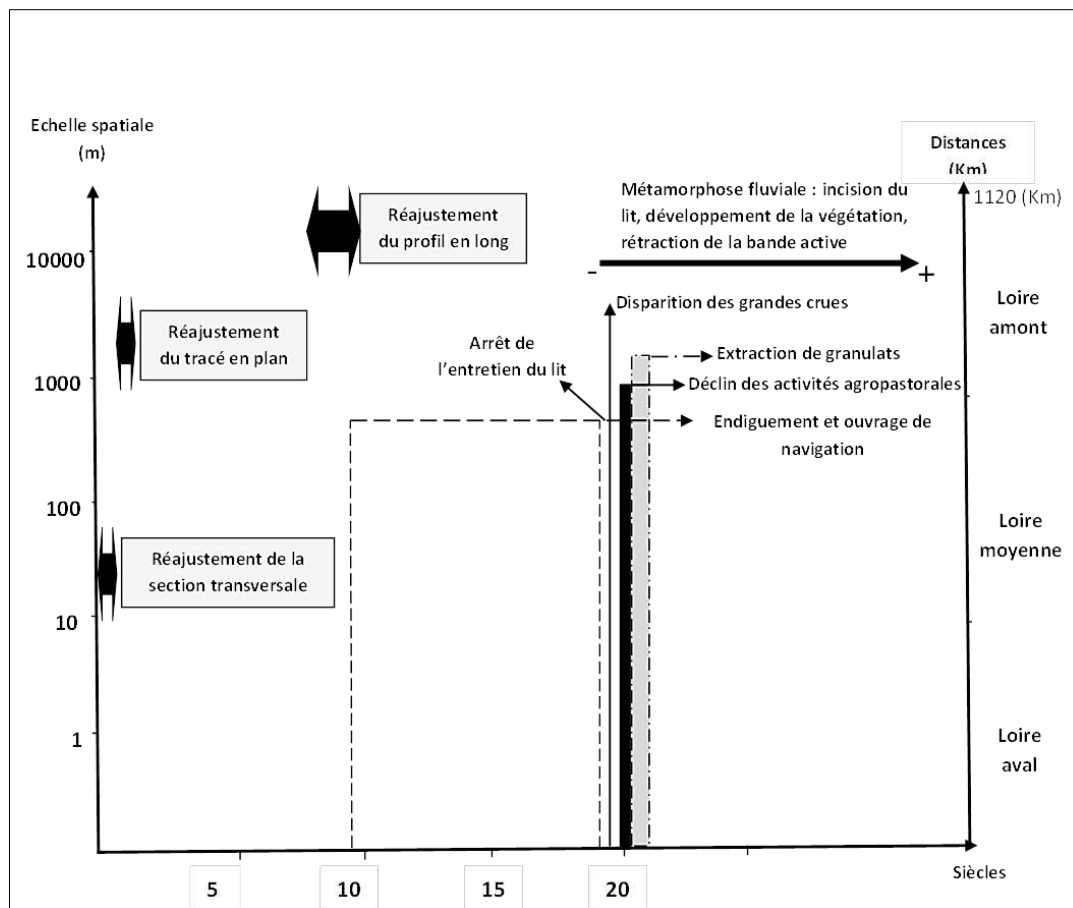


Figure 19. Les enjeux majeurs de la Loire.

Mise en relation des échelles spatio-temporelles d'ajustement fluvial avec celles des facteurs perturbateurs de la dynamique fluviale de la Loire, la fréquence des modifications anthropiques altère le profil d'équilibre du fleuve. (Source : Knighton 1998 adaptée).

2.4 Le manque d'études concernant le transport solide dans le lit de la Loire

Les études concernant les sédiments de la Loire ont connu une évolution qu'on peut mettre en relation avec les rapports d'usages entre les sociétés riveraines et l'espace fluvial (voir figure n°18). Les nombreuses études réalisées au cours de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle avaient pour objectif l'amélioration des conditions de navigation. Des ingénieurs comme **Robert (1845)**, **Comoy (1860)** ou **Galloudec (1897)** ont réalisé grâce aux observations et relevés sur le terrain des rapports portant sur : la description des sédiments du lit (taille), la typologie des faciès des grèves et leur vitesse de déplacement qu'on appelait « la marche des grèves ». **Comoy** estime la vitesse de déplacement des grèves entre le bec d'allier et Orléans à 2,05 km/an, soit 5 à 6 m/jour (**Brossés, 1982**). L'étude de l'évolution spatiale de la charge solide au sein du lit permet à ces ingénieurs de distinguer

les chenaux ayant un tirant d'eau suffisant pour le déplacement des bateaux. La période des travaux des ingénieurs se termine avec le déclin de la navigation dans la Loire. Les études réalisées au cours de la première moitié du 20^{ème} siècle sont peu nombreuses. Elles s'intéressent plus à la genèse des terrasses alluviales (**Denizot, 1914 ; Chaput, 1917**). On passe en l'espace d'un siècle d'un objectif de gestion avec les travaux des ingénieurs à des études visant la compréhension de la mise en place du stock sédimentaire. La deuxième partie du 20^{ème} siècle est marquée par des progrès dans le domaine de la sédimentologie (minéralogie, morphoscopie et transport solide), ce qui a donné un nouvel élan aux travaux de recherche traitant des sujets variés : l'effet de la végétation sur les processus de sédimentation (**Berthois, 1959 ; couderc, 1967 ; Rodriguez, 2004 ; Grivel 2008**), la dynamique fluvial de la Loire et le transport solide (**Babonaux, 1970**), les processus sédimentaires (**Brossé, 1982**). Malgré leurs pertinences, ces différents travaux sont loin d'apporter des réponses à toutes les questions concernant la dynamique morphosédimentaire de la Loire (transport solide, budget sédimentaire, impact de la végétation sur la morphologie du lit...). Ce déficit de connaissance est dû au nombre réduit de travaux de recherche que ce soit à l'échelle de la Loire ou de l'unité fonctionnelle (tronçon). Ce constat met en évidence la nécessité de multiplier les études à différentes échelles spatio-temporelles. Cela afin d'acquérir des données récentes et d'effectuer un suivi continu de ces espaces en perpétuelle évolution. La présente thèse est réalisée en vue d'apporter des éléments de compréhension du fonctionnement morphosédimentaire à une échelle fine. Notre approche d'analyse prend en compte le rôle morphogène de la végétation, du débit liquide et aussi l'impact des aménagements sur la dynamique fluviale. De nouvelles méthodes de mesures et d'analyses sont mises en application afin d'obtenir des résultats précis et fiables. Ces résultats sont mis à la disposition des gestionnaires pour optimiser la gestion et de ces milieux rivulaires.

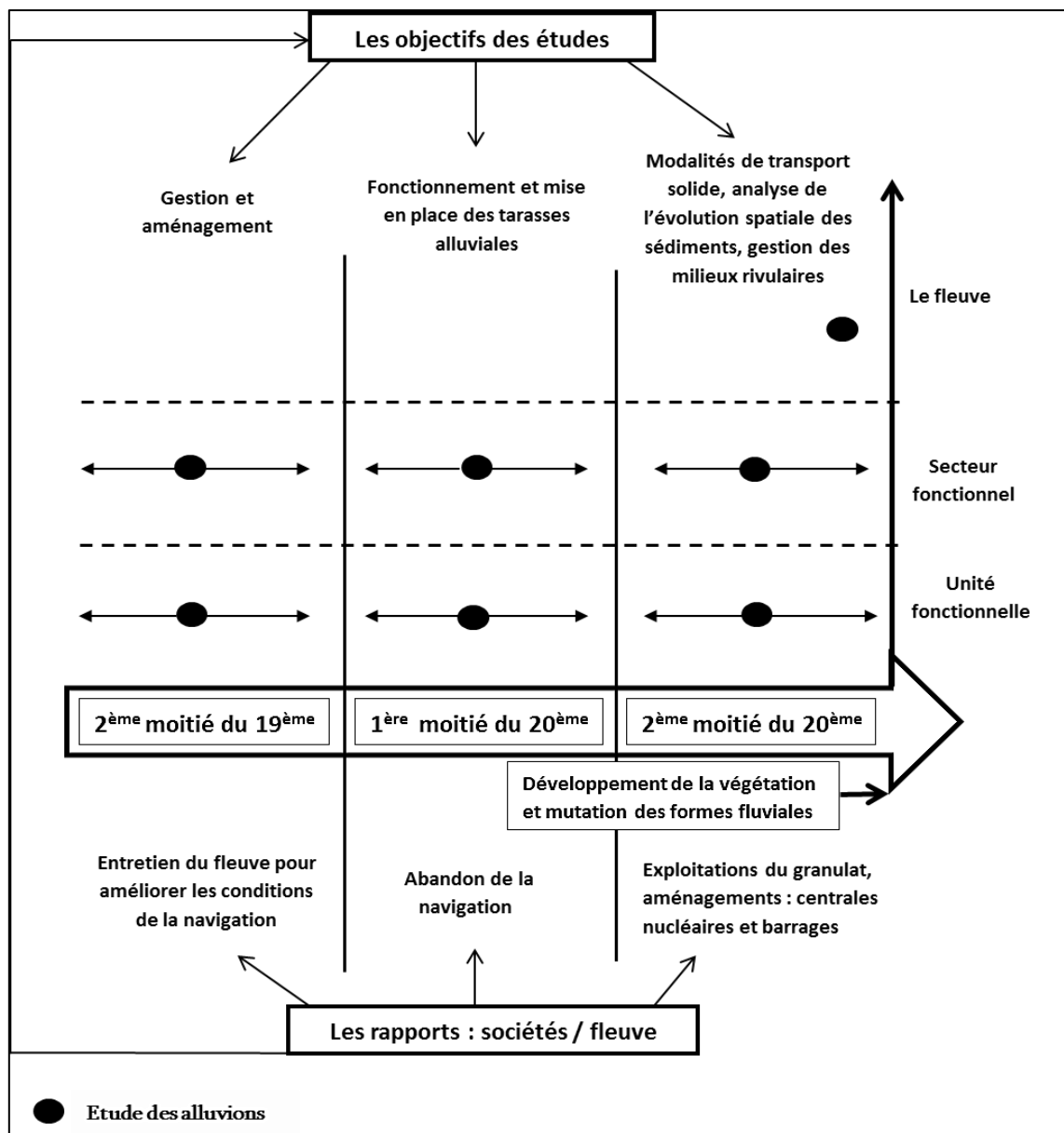


Figure 20. Synthèse des travaux réalisés afin d'étudier les alluvions de la Loire depuis la deuxième moitié du 19^{ème} siècle.

Les études varient en fonction des besoins de l'époque. Les travaux réalisés à l'échelle de la Loire sont très rare et datent de la fin du 20^{ème} siècle (Babonaux 1970, Brossé 1982), on ne dispose donc pas d'informations permettant d'analyser l'évolution morphosédimentaire du fleuve à une échelle pluri-décennale.

Présentation des sites d'étude

Trois sites ateliers ont été définis pour faire l'objet d'une étude à grande échelle : le site de la charité-sur-Loire, le site de Mesves et le site des Méandres de Guilly.

Ces sites ont été choisis en collaboration avec l'AITL, la DDE, la DREAL, le Conservatoire des Espaces Naturels, entre le Bec d'Allier et Orléans. Ils représentent à la fois un champ d'application permettant de répondre aux objectifs de la thèse et des sites de référence pour le suivi et l'amélioration des travaux d'entretien du lit. Le choix de ces sites ateliers se justifie par :

- La présence d'enjeux économiques, sociaux et écologiques (secteurs urbanisés exposés aux risques d'inondation, présence d'une faune et une flore à protéger);

- L'intérêt que portent les gestionnaires à ces secteurs face au manque de données et d'informations relatives à l'évolution morphodynamique du lit actif;
- La présence d'ouvrages fluviaux susceptibles de perturber les transferts longitudinaux et latéraux de la charge solide (chevrette, d'huis, digue);
- L'accessibilité facile et rapide aux sites et la présence de stations de référence pour effectuer les mesures topographiques et bathymétriques.

Comme l'analyse de la réponse géomorphologique du lit mineur suite aux travaux de restauration est au cœur de notre problématique de recherche, ces sites offrent les conditions « idéales » de suivi de l'évolution morphosédimentaire suite aux interventions d'entretien réalisées dans le lit.

Les sites de la Charité-sur-Loire et Mesves se situent dans le périmètre de Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire (un linéaire d'environ 20 km et une superficie de 1500 ha). La RNVL fut créée en novembre 1995 afin de préserver un patrimoine exceptionnel au sein du secteur fonctionnel le plus représentatif et le plus riche de la « Loire des îles » : une vingtaine de milieux naturels différents, près de 620 espèces de végétaux, soit environ 10% de la flore française et plus de 200 espèces d'oiseaux soit près d'un tiers des espèces visibles en Europe, dont près de cent sont nicheuses.

Ce statut permet aux gestionnaires de la réserve de mettre en œuvre des actions d'entretien ou de restauration des milieux naturels et nous offre l'opportunité d'une collaboration avec ces derniers (suivis scientifiques, et sensibilisation du public). Notre travail de recherche se place en continuité des travaux antérieurement réalisés par E.

Gautier (2000, 2001, 2003) et S. Grivel (2008) dans le cadre des programme scientifique mis en œuvre avec la participation des gestionnaire de la RNVL.

D'un point de vue géomorphologique nos deux sites d'étude appartiennent à un secteur où la Loire développe un style d'écoulement proche de l'anastomose.

La plaine d'inondation est marquée par une forte influence anthropique : levée, quai, pont et agglomération. L'analyse comparée de ces deux sites permet de déterminer les rythmes d'évolution des formes (processus d'érosion et de sédimentation) au sein d'un secteur fonctionnel aménagé (La Charité : présence de la Chevrette, le pont) et un secteur moins influencé par les aménagements (le site de Mesves). Cela permet d'appréhender l'impact de des aménagements sur l'évolution morphodynamique du lit actif.

Le site atelier des méandres de Guilly fait partie d'un tronçon où la Loire développe un style fluvial méandrique avec un mode de fonctionnement différent de celui des deux premiers secteurs.

L'objectif est d'analyser l'évolution morphodynamique de deux signatures géomorphologiques différentes au sein d'un hydrosystème qui a subi les mêmes perturbations depuis plus d'un siècle.

D'autres données issus des études réalisées dans le cadre de la ZAL par notre équipe de recherche du LGP de Meudon sont utilisés (maîtrise, DEA, Master 1 et Master 2 et Doctorat) : site de Guilly (Cosaltire 2010 ; Dupret, 2006 ; Guerin, 1996), sites de Fourchambault à Myennes (Nabet, 2006) ; site du bec d'allier, de la RNVL et Soulangy (Gautier 2003 ; Nabet, 2005 ; Grivel 2008) ; site de Bréhémont (Gaultier, 2000) et de la DREAL (rapports) : (Braud et Latapie, 2012), (Gazowski et al., 2007).

Une ancienne occupation des sols et des aménagements susceptibles de modifier la dynamique fluviale

Les sites de la Charité-sur-Loire et de Guilly sont des parties de la Loire moyenne anciennement urbanisées. La Charité-sur-Loire s'est développée autour d'un prieuré clunisien et de deux églises érigées par les moines en 1059, le tout protégé par des

remparts. L'église Notre-Dame, la plus grande d'Europe après celle de l'abbaye de Cluny, est édifiée à partir du XI^e siècle. Le développement du vignoble fut d'abord le fait des moines du prieuré bénédictin.

Le site atelier de Guilly a connu la même histoire, vers l'an 620 deux communautés de moines s'établissent sur la rive nord de la Loire, à 30 km en amont d'Orléans, sur une petite butte proche du village de Fleury, et y construisent une église dédiée à Notre Dame, tandis qu'une seconde colonie de moines s'installe à une centaine de mètres plus loin, autour d'une église Saint-Pierre. Les deux communautés ne tardent pas à fusionner et le monastère est désormais connu sous le nom de Saint-Pierre de Fleury. L'arrivée des reliques de saint Benoît en 660 est à l'origine de la rapide extension, la prospérité et du rayonnement de l'abbaye qui devient Saint-Benoît de Fleury, tandis que le village prit plus tard celui de Saint-Benoît-sur-Loire.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, le site atelier de Mesves sert d'exemple témoin pour estimer le degré d'impact des actions anthropique sur la dynamique morpho-sédimentaire du lit entre levées.

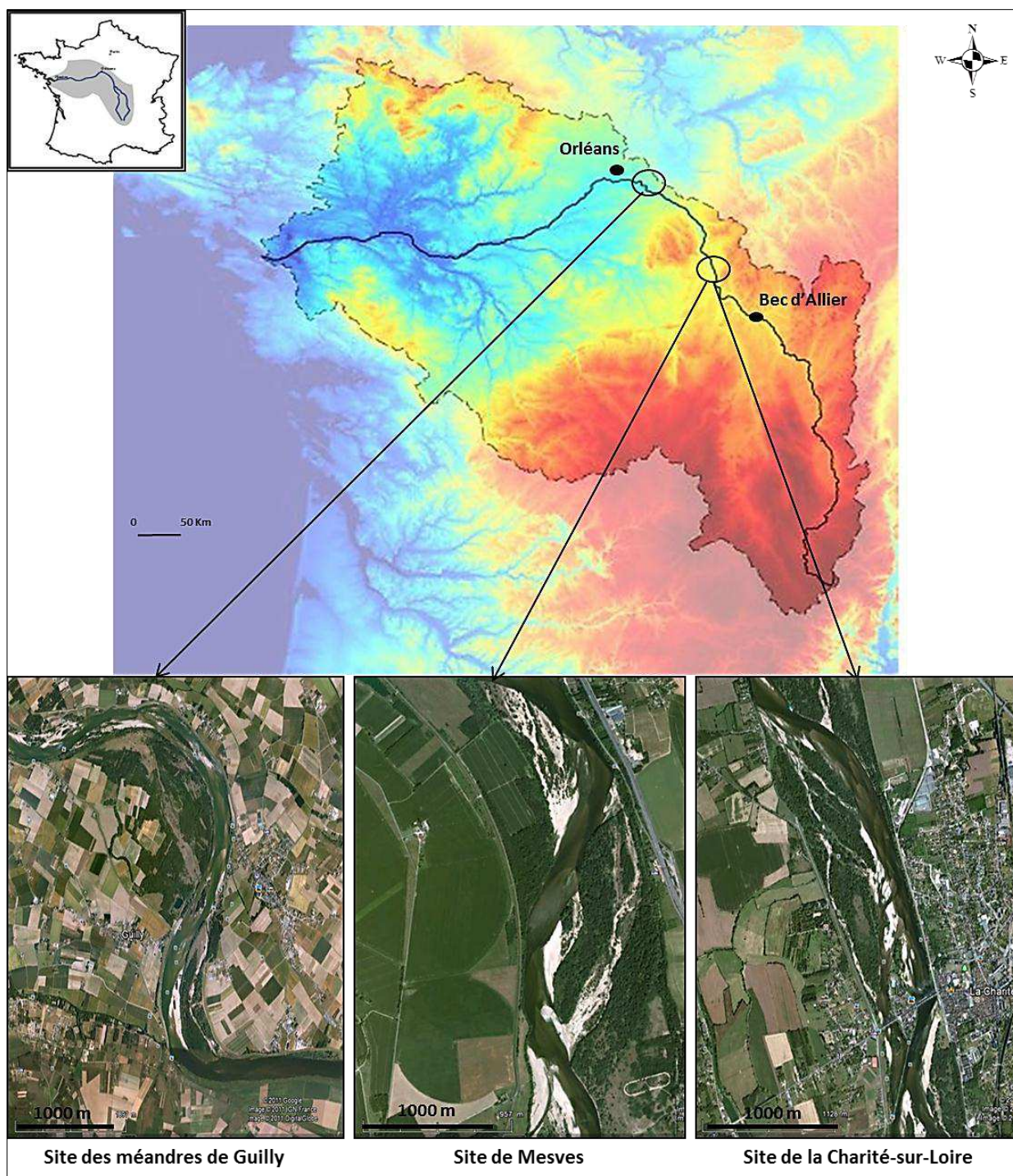


Figure 21. Localisation des sites ateliers.

trois sites ateliers : la Charité-sur-Loire, Mesve et les méandres de Guilly, des exemples de compréhension du fonctionnement de deux formes géomorphologiques différentes, le style d'écoulement « anastomosé » et le style d'écoulement à méandre. Cette approche comparative permet d'analyser les processus de réajustement fluvial suite aux modifications d'origine anthropiques et naturelle apportées à l'hydrosystème ligérien (source des images aériennes : DREAL, 2005).

Le site atelier n°1, La Charité-sur-Loire

Ce site concerne un secteur fonctionnel d'environ 4 km. Les deux unités principales sont le chenal principal et le bras secondaire situé en rive gauche à la hauteur de la ville de la Charité sur Loire. La largeur moyenne de ce bras secondaire est d'environ 18 m et sa longueur avoisine les 3 km (depuis la « Chevrette » de la Charité jusqu'à sa connexion aval avec la Loire au niveau du hameau de Passy). La largeur du lit entre les levées est de 600 m, quant à celle du bras principal elle est de 220 m. ce site se caractérise par une omniprésence d'aménagements : ponts et radier, chevrettes, quai et levées. Ces différents ouvrages participent à différents degrés à la modification de la dynamique hydromorphologique du fleuve. Cela peut provoquer des dysfonctionnements d'ordre géomorphologique et hydrologique.

Le chenal principal s'étend sur environ 3 km, il est d'une largeur moyenne de 250 m. les parties les plus étroites et les plus profondes se trouvent au niveau des deux extrémités (amont 260 m et aval 500 m) du site en rive gauche. Cela crée une dysmétrie dans le profil en travers et favorise les dépôts sable et le développement d'île en rive droite. Entre ces deux secteurs, la ligne du talweg bascule vers la rive droite. D'un point de vue topographique, cette portion du chenal est scindée en deux parties bien distinctes (en période d'étiage) sur toute sa longueur : du côté de la rive droite, le secteur profond où on distingue le substratum et du côté de la rive gauche, une zone moins profonde correspondant aux secteurs de dépôts sableux de différentes classes granulométriques (sables fin, grossier et galet). La ligne du talweg se situe globalement au milieu du chenal en aval du pont de pierre (en raison de l'inclinaison du substratum rocheux vers le milieu du chenal), elle migre vers la rive droite avant d'arriver à la connexion aval de la Loire avec le bras secondaire au niveau de Passy.

Les chenaux secondaires : on distingue 5 bras de différentes tailles : le chenal (A) est le plus long (2,6 km), il longe la levée en rive gauche. le sens d'écoulement des eaux dans ce bras est identique à celui de la Loire. Le chenal (B) s'étale sur environ 900 m. son axe d'écoulement forme un angle d'environ 40° avec celui de la Loire. Ces deux chenaux (A et B) sont en contact avec la Loire au niveau de leurs extrémités amont et aval. Les chenaux

(C), (D) et (E) s'étalent sur environ : 400 m, 450 m et 500 m ; ils relient la Loire au bras (A). La végétation est assez bien développée dans les bras (C) et (D)

Les aménagements et les seuils durs sont omniprésents dans le site, on dénombre :

- deux quais ; le premier se situe au niveau de la partie amont du site en rive gauche et le second en rive droite en aval du pont de pierre,
- deux ponts,
- un seuil rocheux artificiel dans le chenal principal pour le confortement du pont (radier construit en 1984), de nombreux point durs répartis de façon transversale par rapport au tracé de la Loire et oblique dans les bras secondaires. Ces derniers correspondent à d'anciens aménagements (pont et buses d'évacuation de la station d'épuration située en rive droite)
- et la Chevette située au niveau de la connexion amont des chenaux (A) et (B), la présence de la chevette au niveau de la connexion amont du bras secondaire (en rive gauche) favorise le phénomène de « chenalisation ». À travers la déviation des eaux vers le chenal principal (modification de la répartition des énergies des courants). Cette concentration des flux d'eau peut accélérer l'incision du plancher alluvial et l'érosion de la berge. Elle représente également une menace pour les populations riveraines en cas de crue (débordement rapide).

La chevette de la Charité-sur-Loire est une digue submersible construite en 1838. Cet ouvrage avait pour but l'amélioration des conditions de navigation (la déviation des eaux vers le bras principal en période de basse eau). L'objectif des constructeurs était aussi de diminuer le débit au niveau du bras secondaire pour favoriser les dépôts de sable au sein de ce bras dit « bras de décharge », servant à empêcher des éventuels dépôts de sable sur les quais de La Charité (fig. 3).

La chevette s'étend sur 612 m depuis la pointe amont de l'île du Faubourg de la Charité jusqu'à la berge de la rive gauche au niveau de la maison dite de « la Blancherie » sur le territoire de la commune de La Chapelle-Molinard.

Les crues de 1846, 1856 et 1866 ont engendré plusieurs ruptures le long de la chevette (entraînement des enrochements). Cet ouvrage a été d'après le rapport de l'ingénieur

ordinaire de 1887 passablement négligé (voir texte : avis de l'ingénieur en chef, 1887). Les premiers travaux de restauration furent effectués vers 1875 par les ingénieurs des Ponts et Chaussées, les importantes réparations de cette époque ont consisté principalement en la mise en place d'enrochements sur les perrés (figure 23).

La crue de 1977 a été à l'origine d'une ouverture dans la chevrette à proximité de la rive gauche. Cette brèche s'étend désormais sur une soixantaine de mètres

Des réparations ponctuelles en béton réalisées au courant du 20^{ème} siècle peuvent être visibles sur l'ensemble de la chevrette. Le développement de la végétation au sein de cet ouvrage a provoqué la création de fissures (plantes à racines traçantes). Cela a conduit à la désolidarisation de la maçonnerie dans certains endroits. On distingue aussi des zones affaissées et sans joint entre les pavés. Les travaux de nettoyage effectué par la DDE en 1994 avaient justement pour but l'élimination des arbres susceptibles de fragiliser la digue. Cet ouvrage n'est plus utile de nos jours du fait de la disparition des activités liées à la navigation. Il prend une valeur patrimoniale justifiant des investissements pour l'entretenir.

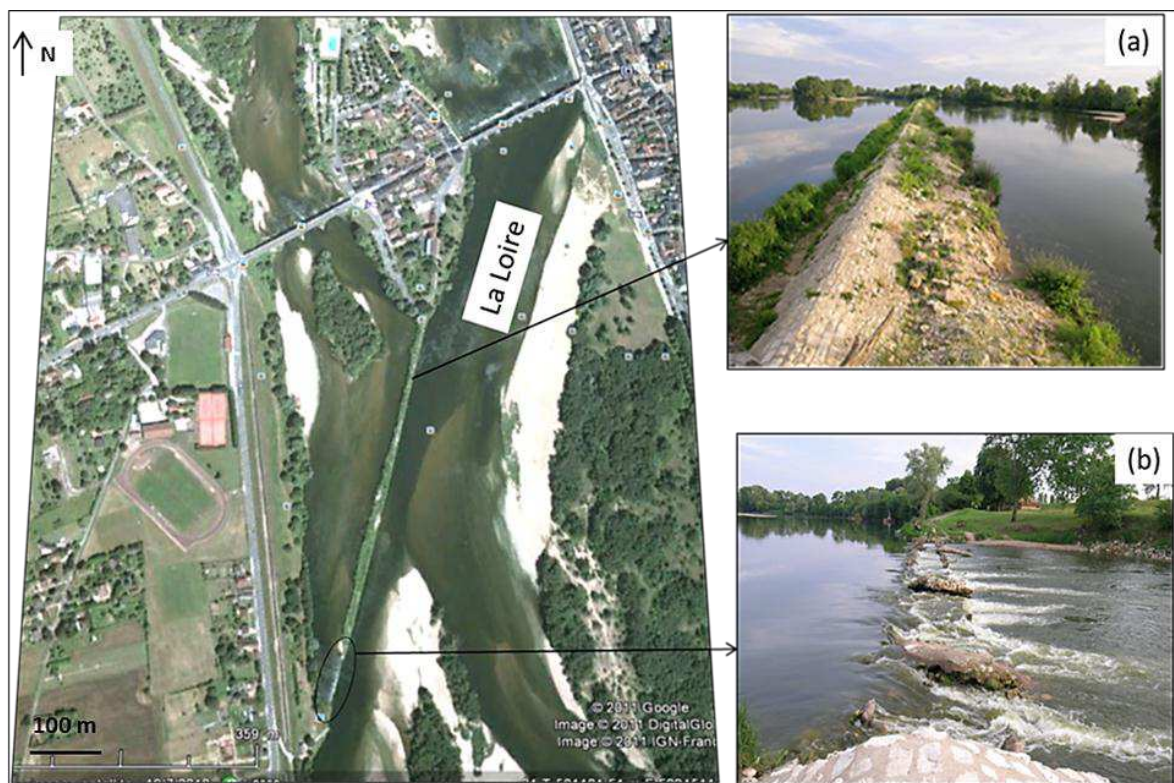


Figure 22. La chevrette du site de La Charité-sur-Loire (a), la brèche (60 m) au niveau de son extrémité amont (b).

Avis

de l'Ingénieur en Chef.

La conservation de la digue basse dite Chevette de La Charité est nécessaire pour maintenir les basses eaux dans le bras principal de la Loire vis-à-vis de la Tille de La Charité, non plus malheureusement en vue de la navigation mais en vue d'usages locaux, tels que conservation des bateaux, lavoirs, bûches de bûches, puisages pour les arrosages privés ou publics, entièrement des résidus des eaux vannes & ménagères qui aboutissent au quai principal de la Tille.

Les dépôts de sable se font principalement grâce à la chevette, dans le bras de décharge qui n'a que peu d'inconvénients, et qu'en tous les cas, en a bien moins que si ces dépôts se produisaient le long des quais.

Ces motifs nous paraissent devoir faire considérer le maintien de l'ouvrage en question comme essentiel, et cependant l'examen détaillé de l'état d'indication des travaux d'entretien des ouvrages de la Loire dans le 3^e Arrondissement, ne permet pas d'accorder une place à ce travail.

C'est ce qui nous conduit à présenter projet ci-joint qui paraît bien étudié, à l'approbation de l'Administration Supérieure.

Nevers, le 12 Avril 1887

Ingénieur en Chef,

[Signature]

Figure 23. Avis de l'ingénieur en chef, 1887 au sujet de la restauration de la chevette de La Charité-sur-Loire (Nabet, 2005, source : archive de la DDT 58)

La dynamique morphosédimentaire du **bras secondaire** est influencée par la présence de la chevrette. Le débit de submersion de cette dernière est de l'ordre de $700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ alors que le module de la Loire à cet endroit est de $350 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (station de Givry). Cet ouvrage réduit de ce fait la compétence du chenal secondaire et favorise le dépôt de sédiments et l'exhaussement progressif du bras. Le passage des eaux vers le bras se fait essentiellement à travers la brèche (largeur environ 60 m), le flux d'eau est concentré et orienté vers la berge de la rive gauche provoquant la formation d'une niche d'érosion à cet endroit. La chevrette a fait l'objet de plusieurs interventions de restauration. Les travaux consistaient à éliminer la végétation susceptible de fragiliser la digue et à restaurer la maçonnerie. L'état de la digue est assez bon, hormis son extrémité amont (au niveau de la brèche) qui est dégradé.

Les berges sont de trois types :

- berges artificielles correspondant au quai longeant la rive droite sur environ 160 m, cet aménagement augmente la résistance de la berge à l'érosion et exclut toute possibilité d'apport de sédiments dans le chenal.
- Le second type de berge est plus naturel, il se trouve essentiellement en rive droite (à l'aval du quai). Il se caractérise par une forte pente et une absence de couvert végétal, la berge est composée de sédiments de différentes tailles allant des sables fins aux galets (déposés sans tri). On retrouve également ce type de berges en rive gauche au niveau des marges des îles en contact avec la Loire. L'érosion est active dans ces secteurs.
- Le troisième type de berge se situe en rive gauche au niveau de la levée (dans le chenal secondaire) sur environ 3 km, ces berges sont protégées par une végétation de différentes tailles (végétation herbacée, arbustes et arbres) on retrouve des traces d'érosion de berge dans les zones où la pente est assez forte.

Les îles occupent une position latérale au sein du lit entre levées. Elles se situent essentiellement en rive gauche. On dénombre dans ce site 3 îles. La distribution spatiale de la végétation peut se corréliser avec la topographie de ces îles. Les forêts à bois dur occupent les parties les plus hautes et les moins submergées. La végétation favorise la stabilité de ces formes insulaires (voir figure..).

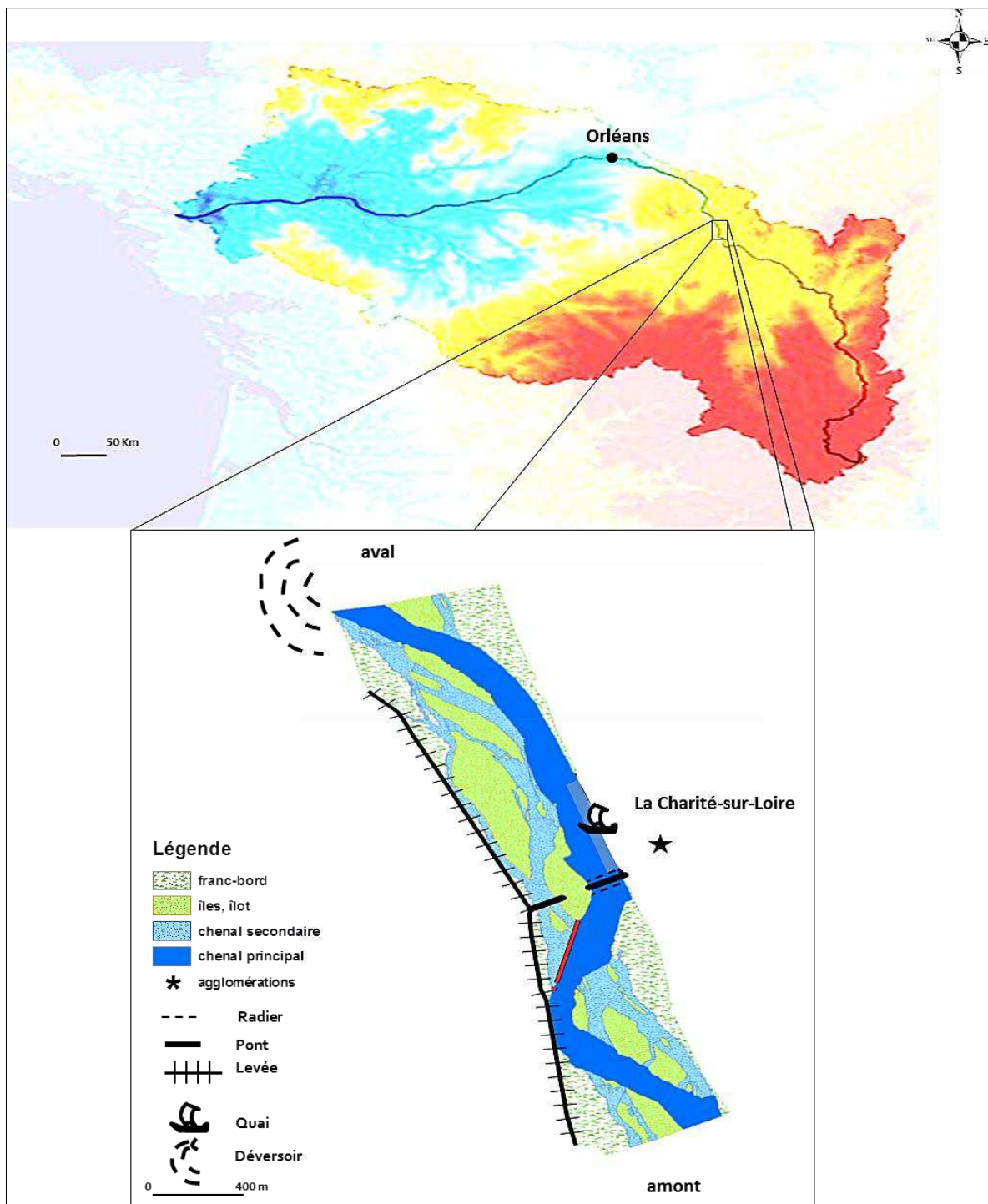


Figure 24. Présentation du site atelier n° 1 : la Charité-sur-Loire.

Localisation en amont de la RNVL à la hauteur de la ville de La Charité sur Loire. Longueur : depuis la chevrette jusqu'à la connexion aval au niveau de Passy, soit un linéaire de 3 km. Les aménagements levées, Chevrette, Pont, quai, seuils artificiels Une action anthropique marquée.

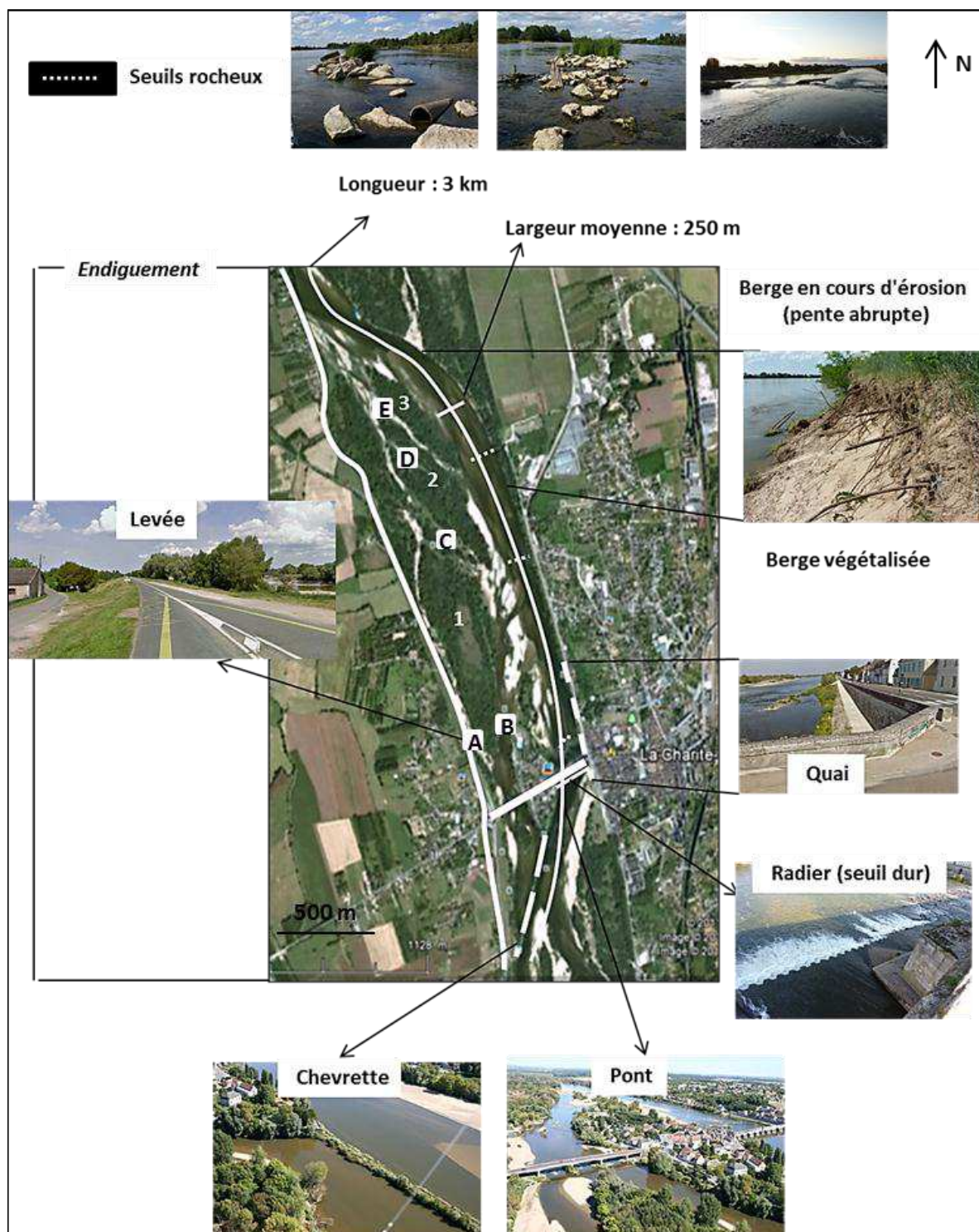


Figure 25. Site atelier de la Charité-sur-Loire, identification des différents éléments constituant le paysage fluvial.

3.2 Le site atelier n° 2, Mesves

Le site de Mesves se trouve à environ 3 km en aval du site de La Charité-sur-Loire, il s'agit du secteur fonctionnel situé en rive droite à la hauteur de la commune de Mesves en aval

de l'île dite « du Lac ». Ce tronçon s'étend sur une longueur d'environ 3 km. Il est constitué d'un bras principal et d'un chenal secondaire séparé par la grande île dite « des Barreaux ». La largeur moyenne du lit entre les levées est d'environ 700 m.

Le chenal principal s'étend sur environ 2,5 km en rive droite, sa largeur moyenne est d'environ 290 m. Dans la partie amont du site, la ligne de talweg passe de la rive droite à la rive gauche entre de grands bancs de sable grossier. Elle longe la levée sur environ 2 km et migre à nouveau vers la rive droite au niveau de l'extrémité aval du site. On note l'absence d'aménagement et de seuils artificiels dans ce secteur. Les traces d'érosion des berges sont bien visibles dans les secteurs les plus profonds (au niveau de la levée en rive gauche et au niveau de la berge de l'île en rive droite).

Le chenal secondaire se trouve en rive droite. Il s'étend sur près de 2 km. Comparé au bras secondaire de La Charité-sur-Loire ce chenal est large. Il a fonctionné comme bras principal de la Loire, il y a une quarantaine d'années. La largeur de ce bras diminue au fur et à mesure que l'on se dirige vers la connexion aval du fait du développement de la végétation (formation d'îlots divisant le chenal en deux petits chenaux dont un en cours de fermeture). L'entrée du chenal est large (120 m en moyenne), elle est surélevée d'environ 1,70 m par rapport au niveau de la Loire pour un débit correspondant au module. La largeur de la connexion aval du bras avec la Loire est d'une vingtaine de mètres. Outre le chenal du site atelier n°1, le bras secondaire de Mesves nous offre la possibilité d'analyser l'évolution morphodynamique d'un autre type de bras : large, perché et dépourvu d'ouvrages susceptibles de modifier les conditions d'écoulement.

Les aménagements et les seuils durs : en dehors de la levée qui longe la berge en rive gauche, le lit mineur évolue dans des conditions relativement naturelles (sans contraintes artificielles).

Les îles sont présentes dans ce site, une grande île dite « des Barreaux » en rive droite séparant la Loire du bras secondaire et une petite île qui s'est formée au centre du site d'étude entre la Loire et l'île des Barreaux donnant naissance au petit chenal. La forêt à bois dur occupent les parties les plus hautes et les moins submergées.

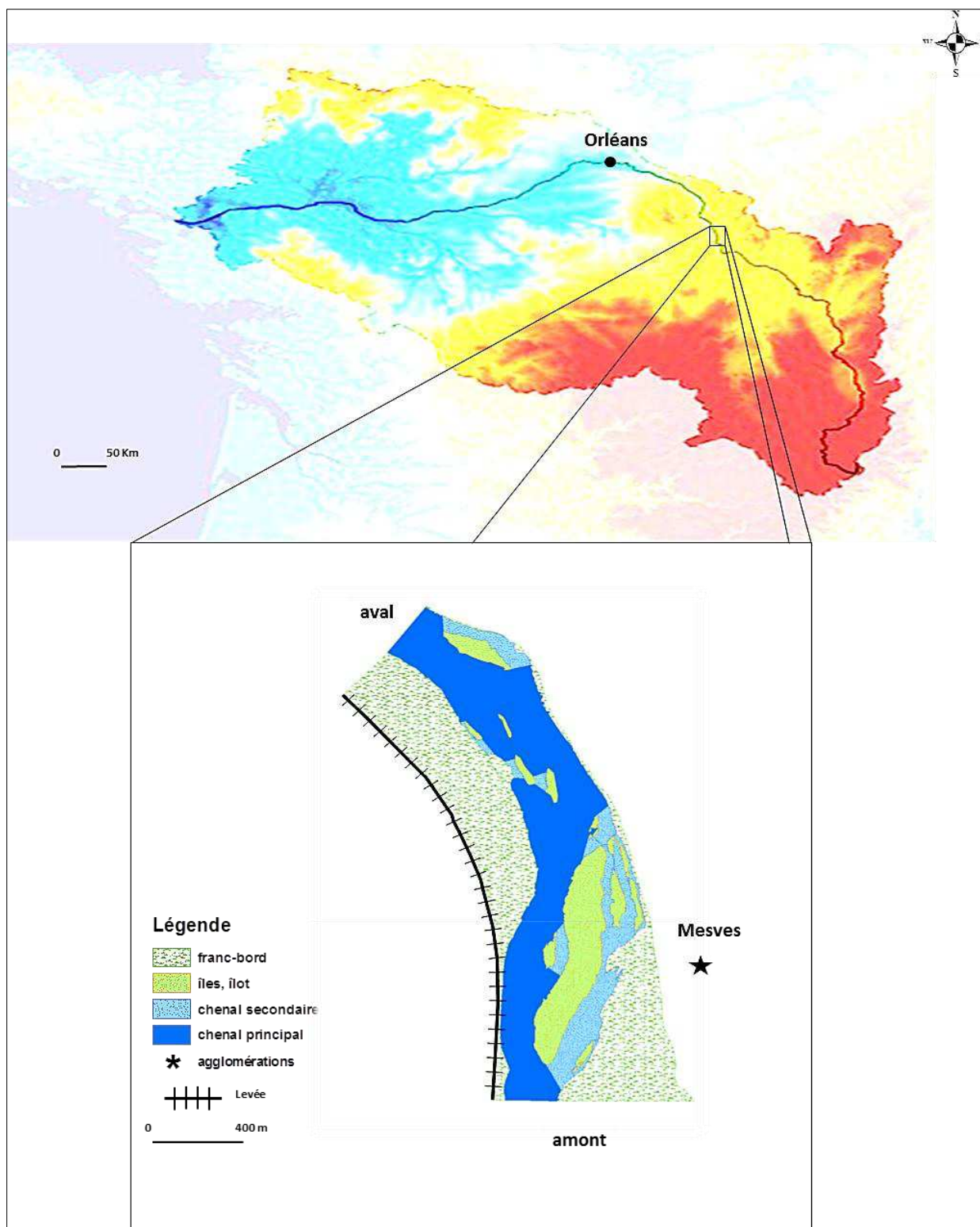


Figure 26. Présentation du site atelier n°2 : Mesves.

Localisation : en amont de la RNVL en rive droite à la hauteur de la ville de Mesves. Longueur : 3 km. Les aménagements : levées. Une action anthropique moins marquée, présence d'îles de grande taille.

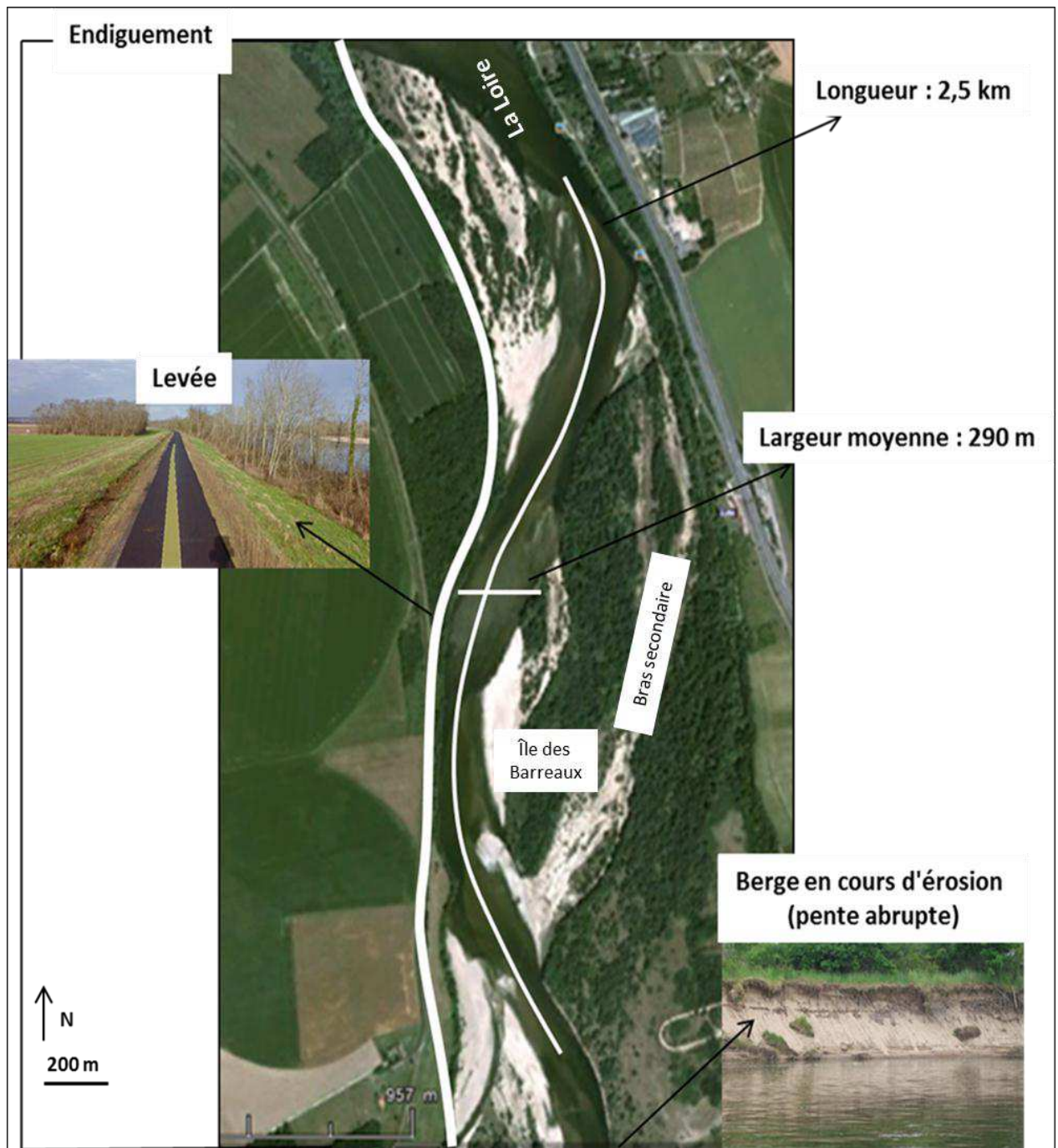


Figure 27. Site atelier de Mesves, identification des différents éléments constituant le paysage fluvial.

Le site atelier n° 3, les méandres de Guilly

Le site d'étude se situe à environ km en amont d'Orléans, il concerne les deux premières boucles des méandres de Guilly, allant du lieudit « Bouteille » au lieudit « Villabé ». La longueur développée du lit est d'environ 9 km, la largeur moyenne du lit entre les levées est d'environ 500 m, quant à celle du chenal principal elle est d'environ 320 m. Les levées

sont exposées aux risques d'érosion (par affouillement) au niveau des pieds de berges concaves. On distingue au sein du lit mineur plusieurs atterrissements, îlot et île boisées, présentant les mêmes enjeux que les deux secteurs précédemment présentés (La Charité-sur-Loire et Mesves). D'un point de vue géomorphologique ce site présente des caractéristiques très particulières qu'on ne retrouve pas sur les cours d'eau à méandres : il inclut des îles, qui sont de taille variable, stables. Elles peuvent s'être formées sur les marges du cours d'eau tel l'île dite « des Maïs » ou au milieu du chenal comme l'île située au droit du port de Saint Benoit.

On distingue en amont de ce site un **chenal secondaire** en rive droite « bras des Maïs ». Ce dernier s'étale sur 2 km, sa largeur moyenne est de 65 m. L'absence de la végétation dans ce bras et la présence de secteurs d'érosion au niveau des berges attestent d'une dynamique hydro-sédimentaire active. Ce bras secondaire est souvent connecté à la Loire, la connexion se fait d'abord par l'aval à un débit avoisinant $210 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ puis par l'amont avec un écart d'environ $30 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (station de Gien). Ce fonctionnement hydrologique est probablement lié à la position du bras secondaire au sein du lit, ces caractéristiques topographiques, à la géométrie du chenal principal (tracé méandriforme) et à la présence d'îles au droit de la connexion aval du bras (concentration des eaux).

Les aménagements et les seuils durs sont omniprésents dans le site, on distingue :

- deux quais situés à Saint-Benoit et Bouteille,
- des levées longeant le lit sur ses deux rives, en dehors du secteur du « grand Rio », ces levées sont en contact direct avec le cours la Loire.
- des palplanches sur les berges : L'érosion des berges est active dans ce site présentant une menace pour la stabilité de la levée. Pour réduire l'impact de cette érosion, des palplanches ont été installées dans les secteurs les plus profonds (présence de mouilles au niveau des extrémités amont et aval du site). Ces ouvrages protègent la berge à une profondeur limitée, l'érosion de la levée est donc active au fond du chenal principal.
- De nombreux seuils rocheux ou artificiels de taille considérable sont disposés dans le chenal de façon longitudinale par rapport au tracé du lit. Ces derniers sont susceptibles de perturber le transit sédimentaire dans le lit.

On dénombre trois **îles** dans ce site : la première occupe une position latérale « l'île des Maïs » (en rive gauche en amont du site), la seconde se situe au milieu du lit à la hauteur du Port de Saint benoit « l'île de Saint Benoit » et la troisième se situe au milieu du lit en aval du site d'étude « l'île des Boutrons ». Ces îles sont en contact avec les seuils rocheux, ce qui favorise leur la stabilité. La végétation arborée occupe la majeure partie de ces îles.

La plaine alluviale des méandres de Guilly est un secteur susceptible de réduire considérablement l'impact des crues sur les zones urbanisés situées en aval (Orléans, Tours) il s'agit en effet de l'un des larges vals entre Nevers et Saumur environ 7 km Du point de vue géomorphologique, ce secteur présente de nombreux intérêts :

l'originalité et la rareté de ces formes sinueuses en Loire moyenne,

la position de transition entre une Loire à bras multiples et une Loire à tracé rectiligne, présence d'îles dans un secteur à méandres.

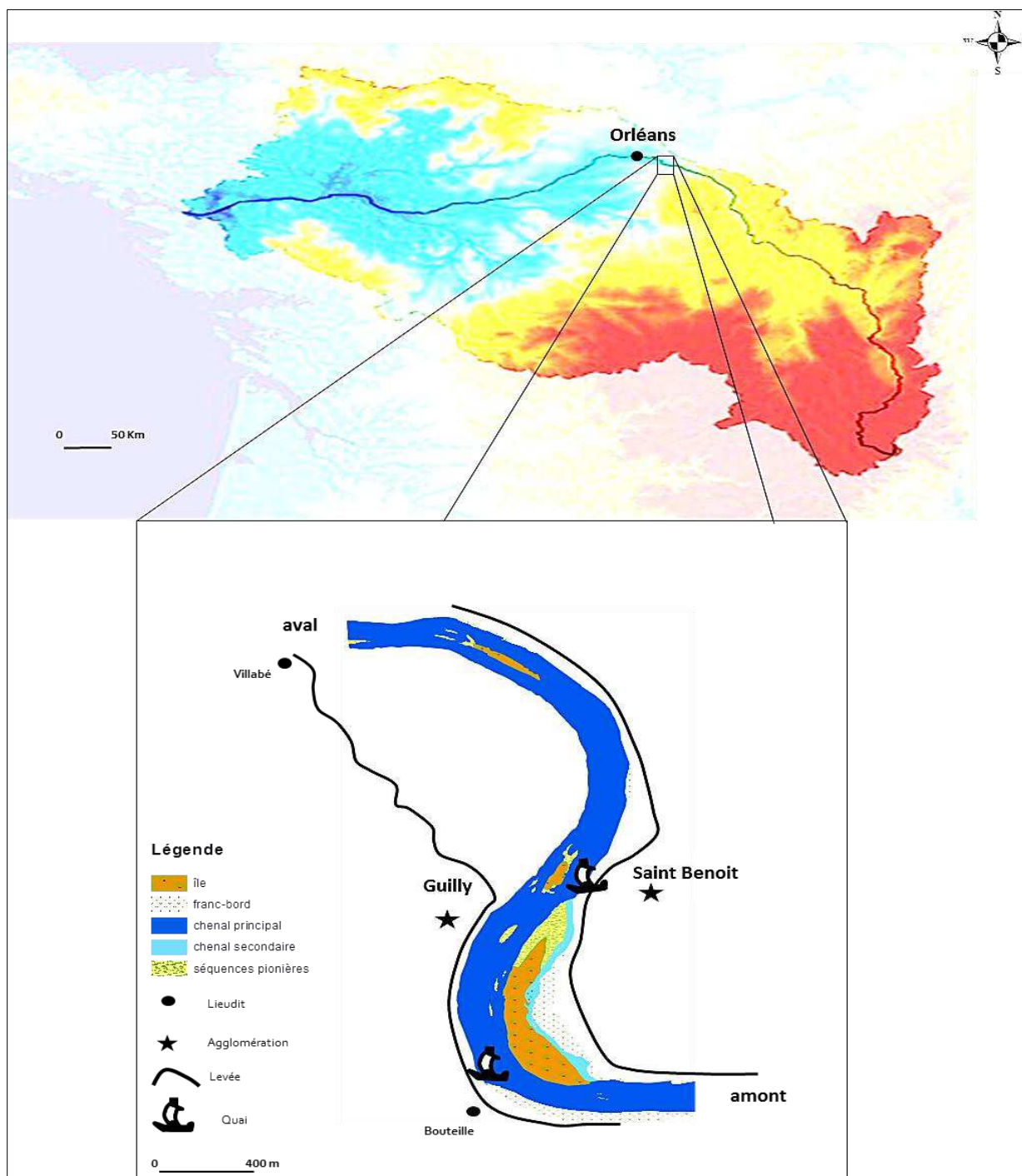


Figure 28. Présentation du site atelier n° 3 : les méandres de Guilly.

Localisation : Le site d'étude concerne les deux premières boucles des Méandres de Guilly (Loiret), allant du lieudit « Bouteille » au lieudit « Villabé ». La longueur développée du lit : est d'environ 9 km. Les aménagements : levées, quais, seuils artificiels. Une action anthropique moins marquée.

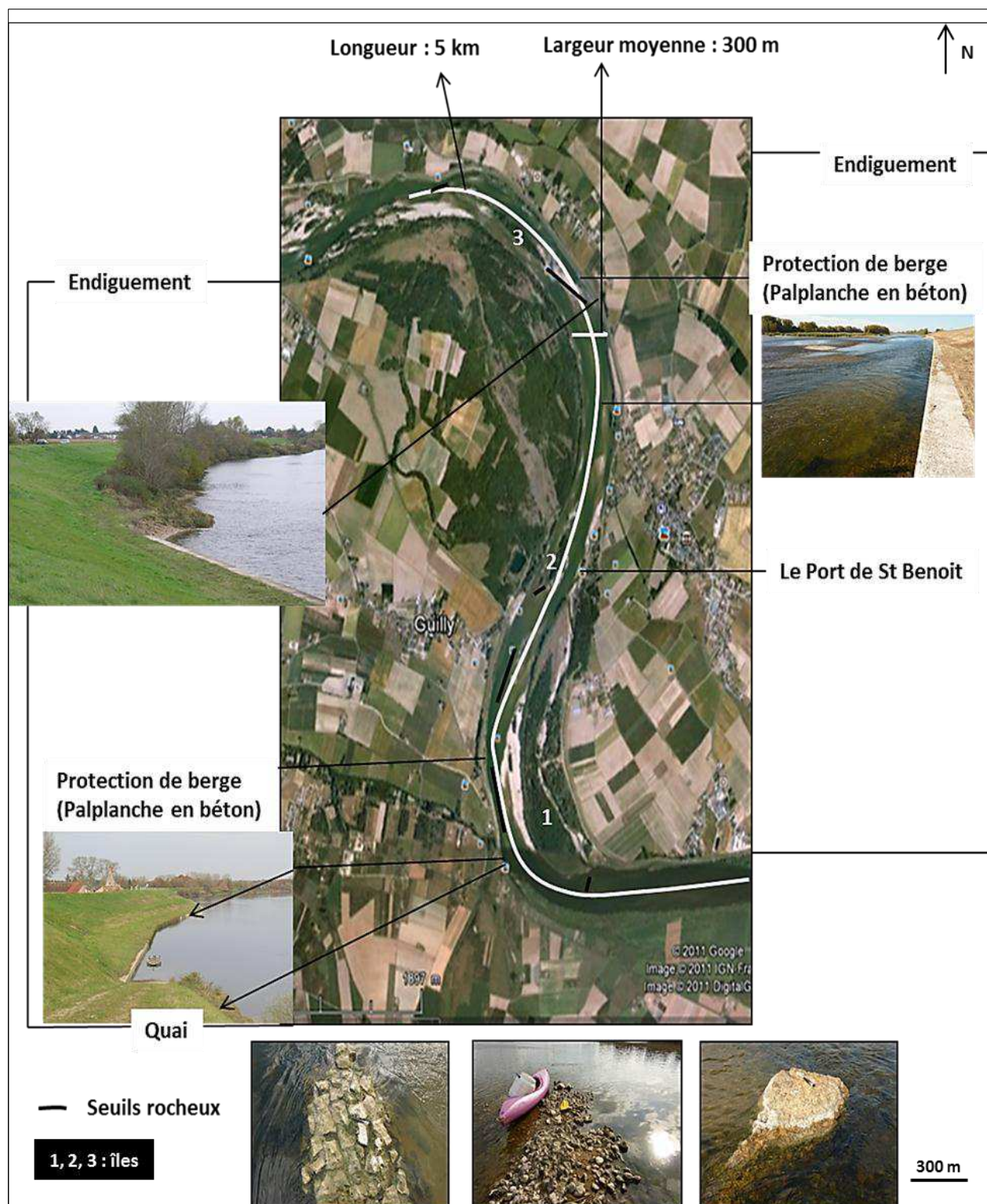


Figure 29. Site atelier de Guilly, identification des différents éléments constituant le paysage fluvial.

Tableau 4. Caractéristiques physique et hydrologique des sites d'étude

Numéro du site d'étude	site atelier n°1	site atelier n° 2	site atelier n°3
Nom du site atelier	la Charité-sur-Loire	Mesves	Les méandres de Guilly
Longueur du secteur fonctionnel	4 km	3 km	9 km
Largeur de la bande active (2005)	230 m	350 m	335 m
Largeur du lit entre levée	600 m	700 m	500 m
Largeur de la plaine	2 à 4 km	2 à 4 km	7 km
Pente du cours d'eau (m m ⁻¹)	0,0005	0,0005	0,0005
Puissance spécifique	11 – 12 W m ⁻²	11 – 12 W m ⁻²	11 – 12 W m ⁻²
Unités fluviales	chenal principal, bras secondaires, îles, franc-bord	chenal principal, bras secondaire, îles et franc-bord	chenal principal, bras secondaire, îles et franc-bord
Nombre de chenaux	4	2	2
Débit moyen	350 m ³ .s ⁻¹	350 m ³ .s ⁻¹	350 m ³ .s ⁻¹
Débits de connexion des bras secondaires	280 m ³ .s ⁻¹	950 m ³ .s ⁻¹	230 m ³ .s ⁻¹
Stations hydrométriques	Givry	Givry	Gien
Types d'aménagements	Levée, chevette, pont, radier, quai	Levée	Levée, quai

Le contexte de l'entretien du lit de la Loire

Contexte historique

Jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle, les objectifs de l'entretien du cours d'eau étaient de maintenir voire d'améliorer la navigabilité. Pour cela il fallait concentrer les eaux dans un chenal où le tirant d'eau devrait rester suffisant, le plus longtemps dans l'année. Il fallait donc éviter la formation d'obstacles (encombres, atterrissements) susceptibles d'obstruer le passage des navigateurs. Le rôle économique majeur qu'avait le fleuve à cette époque justifiait l'entretien systématique du lit afin de maintenir le chenal auprès des ports et au pied des écluses de communication avec les canaux. La navigation concurrencée par le rail a rapidement disparu à la fin du 19^{ème} siècle.

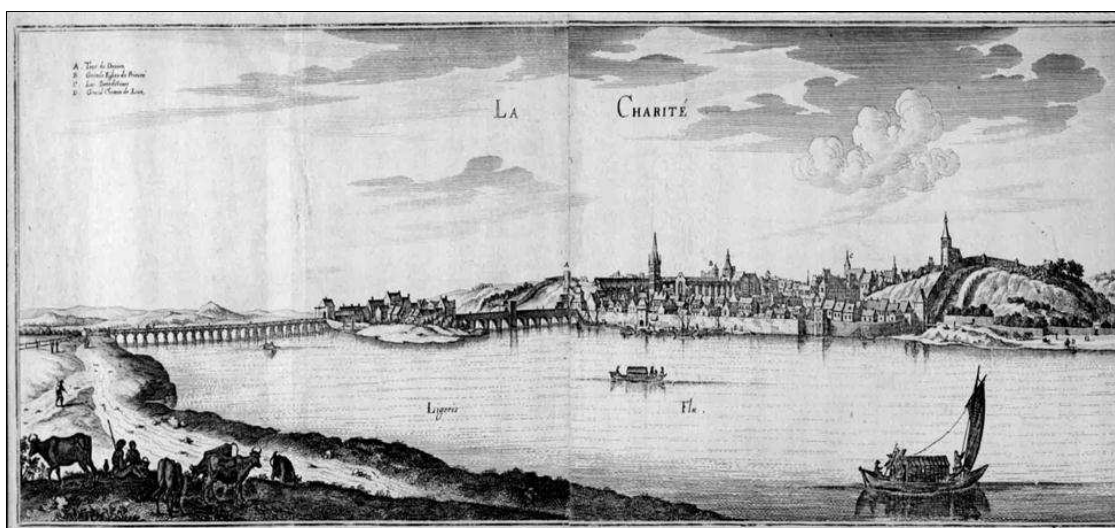


Figure 30. Site atelier de La Charité-sur-Loire avant la construction de la chevrette.
(Source : Musée de la Charité sur Loire).

Contexte actuel

Les différents travaux de restauration et d'entretien du lit de la Loire s'inscrivent dans le cadre du **Plan Loire Grandeur Nature**, annoncé le 4 Janvier 1994. Ce plan global d'aménagement de la Loire vise à concilier la sécurité des personnes, la protection de l'environnement et le développement durable.

Cinq ans plus tard, l'Etat intègre ce programme dans une perspective de contrat Etat-région pour une période allant de 2000 à 2006 et 2007 à 2013. Plus de 109 millions d'euros ont été consacrés par le gouvernement pour ce projet, désormais intitulé « Programme inter-régional Loire Grandeur Nature ».

Les organismes intervenant dans la gestion et l'organisation des travaux sont :

- *La Direction Régionale de l'Environnement du Centre*, un service de l'Etat représentant le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Sa mission vise la préservation de l'environnement. Cette composante est impliquée dans les politiques publiques et les projets d'aménagement. La *DREAL* est considérée comme le principal acteur faisant tourner les différentes actions d'aménagement et de protection de l'environnement. Ces actions sont animées par deux organismes à l'échelle de la Loire moyenne :

- *le Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons (C.S.N.B)*

- *le Conservatoire des espaces naturels de la Région Centre (C.P.N.R.C)*

Ces derniers se chargent de la restauration des milieux dégradés, de la protection de la faune et de la flore menacées et de la conservation et de la gestion des sites naturels.

La préservation des zones d'intérêt écologique s'inscrit dans les mesures européennes relatives à la protection des milieux naturels. Ces différentes actions ont été financées par le programme L.I.F.E. Quant à la DDT, elle s'occupe de la réalisation des travaux d'équipement, de restauration et d'entretien du Domaine Public Fluvial. Ces opérations visent globalement à rétablir une dynamique de l'hydrosystème à travers l'ouverture des chenaux secondaires, la dévégétalisation et remobilisation des sédiments et des embâcles. L'objectif est de restituer au cours d'eau un espace permettant l'extension de la lame d'eau, l'amélioration de la capacité d'écoulement et par conséquent réduire le risque d'inondation en cas de crue (abaissement de la ligne d'eau).

4.1 Typologie des travaux de restauration et d'entretien du lit

Les travaux entrepris par la DDT (58) dans le **lit mineur** (bras principal et chenaux secondaires) ont pour objectifs de limiter la limitation de l'extension de la végétation, celle-ci pouvant être à l'origine de la fixation des dépôts sédimentaire, le développement des îles et du comblement des chenaux secondaire. Cela favorise la rétraction de la bande active et l'aggravation de l'impact des crues. Les interventions de restauration sont visent la mobilisation des accumulations de sédiments stockés dans les bras secondaires à travers la suppression de la végétation. D'autres travaux d'entretien sont réalisés au niveau des berges afin d'assurer leurs protections contre les processus d'érosion qui pourraient porter

préjudice à certains aménagements (pont, levée). Ces travaux de protection consistent à l'élimination bord de berges des arbres à système racinaire traçant et les arbres morts, l'installation de palplanche et d'enrochement.

Les opérations menées sur les îles sont différentes, du fait de la dynamique particulière de ces unités et de leur position au sein du lit. Les processus d'érosion-sédimentation sont propres à ces formations et nécessitent ainsi des actions particulières d'entretien. Les actions principales consistent à gérer l'érosion et lutter contre l'extension de la végétation (connexion des îles entre elles et au franc-bord). Dans le cas de la Loire, les îles sont, pour la plupart livrées à elles-mêmes du fait de l'abandon progressif des usages sur le cours d'eau (disparition du pâturage). Cela a favorisé le développement d'une végétation souvent de type *Saulaie* *Peupleraie*. Les actions d'entretien sont souvent favorables au niveau des parties sensibles à l'érosion (tête d'îles). Elles consistent à un recépage de tous les gros arbres en rive, un enlèvement ou fixation des encombres selon l'état de la berge, la suppression des arbres morts et le pâturage extensif pour l'entretien régulier de la basse végétation.

Les travaux de restauration réalisés dans les bras morts prennent en considération le degré de connexion de ces bras avec le lit principal et les chenaux secondaires. Les résultats de ces actions d'entretien ne sont pas toujours positifs car elles dépendent de la réponse du cours d'eau, de l'état du bras et des apports en eau. Les travaux sont à mener avec beaucoup de prudence car ces milieux abritent souvent une faune riche et diversifiée (sensible à la modification du milieu). Les interventions souhaitables dans ce type de milieux sont : des interventions sur la berge selon le principe de la diversité des tailles, des âges et des espèces végétales, une coupe d'arbres à système racinaire traçant (entretien de quelques arbustes, équilibre des berges), la fixation de certains encombre en rive et la dévégétalisation au milieu du bras.

Les boires sont des annexes hydrauliques déconnectées complètement du lit principal et qui ne seront plus alimentées que par les relations avec la nappe. Elles représentent des milieux fragiles qui nécessitent réflexion et prudence avant toute intervention. Leur fond est constitué essentiellement de vases et limons. Leur configuration particulière exclut

tout remaniement sédimentaire important. Ces zones abritent des peuplements spécifiques. Les espèces sont souvent menacées du fait de la raréfaction de ces milieux suite à l'abaissement de la ligne d'eau, d'étiage (abaissement de la nappe suite à l'incision du plancher alluvial). Les travaux d'entretien ne doivent pas conduire à la modification de ce milieu, mais à le faire évoluer de façon à favoriser la pérennité des espèces en prenant en compte le fonctionnement de l'ensemble de l'écosystème dans l'espace et le temps (en relation avec les autres unités de l'hydrosystème, ex : la nappe souterraine). Les interventions systématiques de dégagement (ouverture) sont à éviter. Il serait préférable d'effectuer des interventions ponctuelles programmées à l'échelle de plusieurs années et évaluer par la suite les résultats. Les interventions souhaitables dans ce type de milieux sont : une coupe d'arbres morts susceptibles de tomber dans la boire, un recépage en haut de berge des peupliers et frênes, un recépage de rajeunissement des plus gros sujets, un recépage de la végétation buissonnante des berges et la fixation de certains encombres au niveau des berges.

L'entretien des **ouvrages** de navigation est compliqué. Cela du fait de la multitude de problèmes que peuvent provoquer les ruptures au sein des digues (renards : passage d'une quantité d'eau sous ou dans la levée entraînant l'enlèvement de la partie fixe de l'ouvrage. surverse : passage des eaux par-dessus la levée....) et la difficulté d'accéder à ces ouvrages (dans de nombreux cas). La fragilisation des digues peut être provoquée par la présence d'une végétation arborescente importante.

La question de l'utilité de ces ouvrages se pose de nos jours surtout depuis que la Loire n'est plus navigable. Leur suppression totale peut provoquer des réponses inattendues. Il sera donc préférable dans certain cas de trouver un compromis entre aménagement et préservation de ce patrimoine. L'entretien doit s'adapter aux objectifs recherchés, il varie entre un déboisement total pour vérifier l'absence du « renards » dans la digue, au déboisement partiel visant à maintenir en place une végétation qui sera peu préjudiciable à l'ouvrage. Les interventions souhaitables sur ce type d'ouvrage sont : une coupe des gros arbres avec ou sans dévégétalisation des souches, coupe et recépage des arbustes,

élimination des encombres, contrôle de la végétation envahissante, et la restauration et entretien des ouvrages (maçonnerie..).

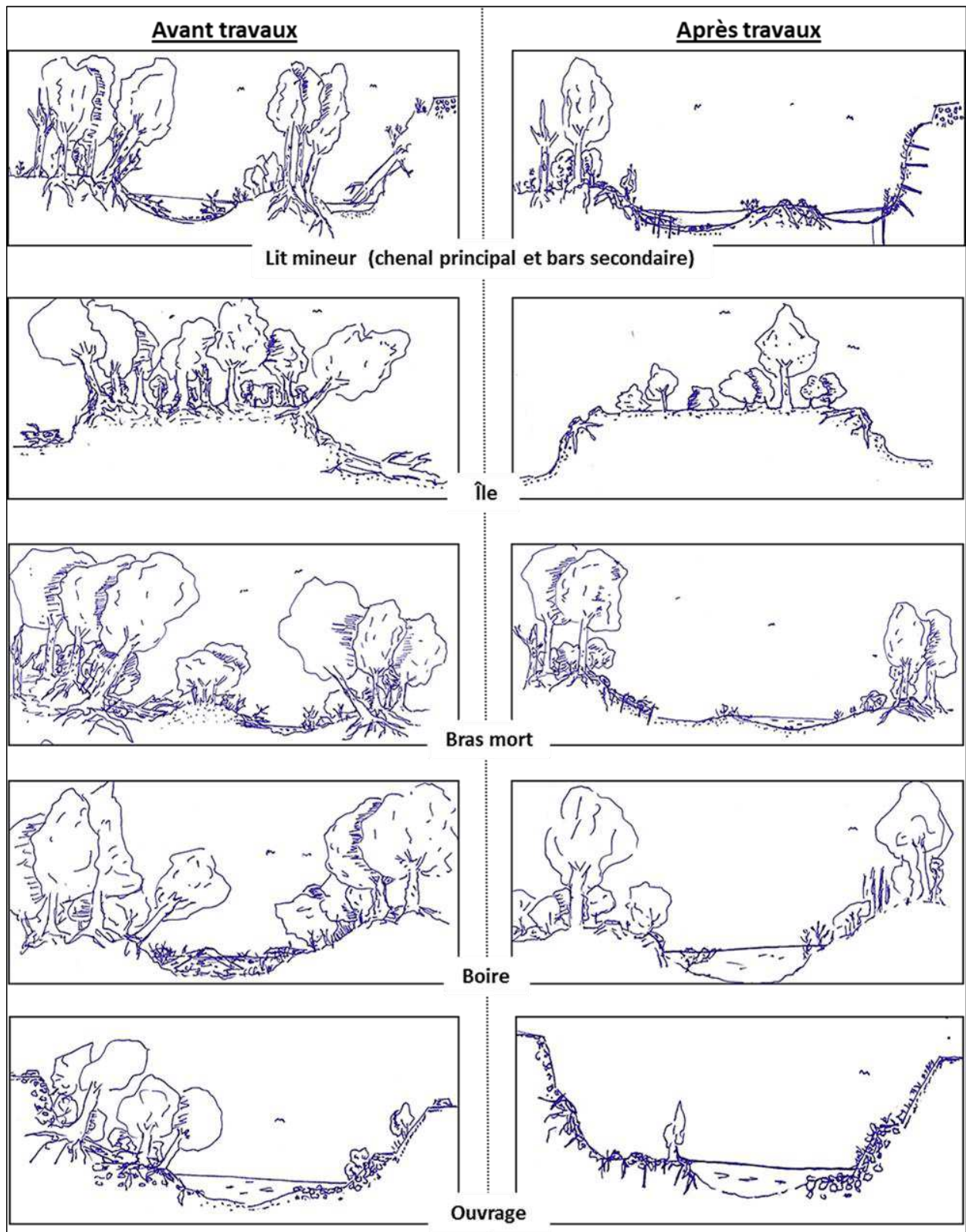


Figure 31. Typologie des travaux de restauration et d'entretien des différentes unités fluviales

4.1.1 Les travaux réalisés dans le site de La Charité-sur-Loire

Les premiers travaux de restauration réalisés dans le site de la charité datent de 1994. Ces interventions consistent à un abattage d'arbres implantés au sein de la Chevrette (principalement des Saules et Peupliers), nettoyage et restauration des maçonneries (interventions répétées en 2001, 2002, 2003 et 2004).

Dans le lit, les interventions ont été diverses et variées : Les travaux concernent un périmètre d'environ 2 km depuis la chevrette de la Charité à Passy. On enregistre au sein de ce site les interventions suivantes :

- Une dévégétalisation au niveau des piles du pont dit « de Fonte » en rive gauche en aval de la chevrette. Cela afin de favoriser l'écoulement des eaux sous le pont.
- Un retalutage effectué au niveau d'une berge du Faubourg pour favoriser les processus d'érosion
- Un curage a été réalisé au sein du ruisseau du lieudit « châteaux vert » pour assurer une circulation permanente des eaux
- Un aménagement d'une frayère en rive droite au droit du site de Passy.

Des saules ont été taillés pour faciliter l'évacuation des eaux en cas de crue (une taille jusqu'à une hauteur de 3 m laissant un sol assez nu). Quant au traitement d'embâcles, il a été systématique en tête des îlots et sélectif sur les berges. Les végétaux coupés ont été brûlés sur place.

La reprise des travaux d'entretien du lit a eu lieu en 2003, soit 9 ans plus tard. Ce laps de temps a permis à la végétation de se développer de façon considérable au détriment de la bande active. Les travaux réalisés entre 2001 et 2010 ont été organisés comme suit :

Passy (2003)

Les travaux réalisés en 2003 consistaient à dégager des bras secondaires au droit et en amont du déversoir de Passy à travers le nettoyage et la scarification de la végétation. S'ajoute à cela une élimination d'encombres dans le bras secondaire et dans la Loire. Des travaux de dévégétalisation et de scarification ont été effectués en 2005 en aval rive gauche du bras dit de Passy. Le but de ces travaux est d'augmenter la pente en aval du bras de la rive gauche afin de faciliter l'évacuation des sédiments vers la Loire.

En amont rive droite pont de la Charité, rive droite (2004, 2005)

Des travaux de dévégétalisation ont été effectués en amont rive droite de l'île dite « de Voluray » ainsi qu'une élimination des encombres accumulés en tête de l'île et au milieu du bras secondaire. Une élimination de la végétation pionnière arbustive a été réalisée aussi au niveau d'un atterrissement situé au lieudit « les Riots ».

En aval du pont de la Charité

Le but de cette opération est de favoriser l'écoulement sous le pont, protéger les berges et les ouvrages (pont et chevrette). Cela à travers l'élimination des arbres susceptibles de les déstabiliser. Les encombres ont été évacués afin d'éviter la formation de bouchons pouvant provoquer des contraintes hydrauliques. Cette opération s'est échelonnée sur les années 2004 et 2005 (réalisée à 75 % en 2004). En amont rive gauche du pont de Fontaine Les travaux entrepris consistent à : un dégagement des encombres accumulés au niveau des piles du pont de Fontaine, une suppression de la végétation à l'amont immédiat de l'ouvrage et un débroussaillage et entretien de la berge en amont rive droite du pont de Fontaine. D'autres interventions visant l'entretien de berge ont eu lieu au sein de l'île située entre la chevrette et le pont. Elles consistent à une élimination des arbres penchés et à l'évacuation des encombres.



Photo 1. Élimination des encombres et des arbres penchés au niveau de la tête d'île située entre la chevrette et le pont de Fontaine (Source : DDT Saint Satur 2004).

En aval rive gauche du pont de Fonte

Des travaux de dévégétalisation et de débroussaillage ont été prévus au niveau des piles du pont : il s'agit de supprimer la végétation et les embâcles accumulés à cet endroit

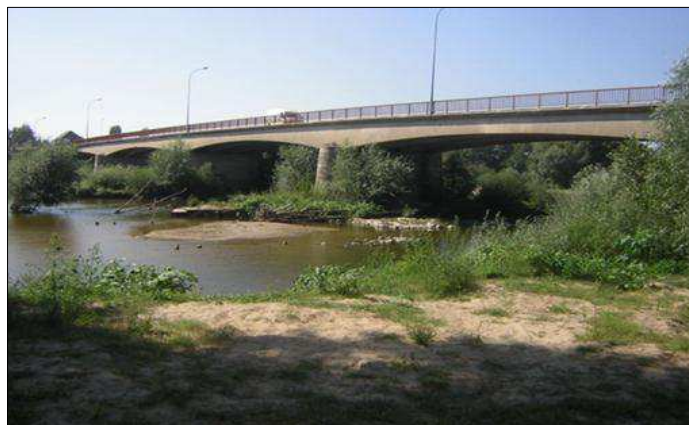


Photo 2. Vue amont du pont de Fonte, des encombres accumulés au niveau des piles. L'objectif des travaux est la suppression de la végétation arborescente trop importante (Source : DDT Saint Satur 2004).

L'île du Faubourg

Il s'agit de la restauration du bras secondaire situé en aval du pont sur l'île du Faubourg (au niveau du bar de la plage). Les travaux visent l'élargissement et la réouverture de ce chenal. Ces interventions consistaient à une scarification afin de détruire les systèmes racinaires des arbres. Elle est réalisée immédiatement après la dévégétalisation.



Photo 3. Vue aval du bras secondaire à restaurer sur l'île du Faubourg. Les actions menées sont : dévégétalisation et scarification sur 500 m, mouvements de matériaux et évacuation des végétaux arrachés. Objectif : favoriser l'écoulement dans le bras secondaire (Source : DDT Saint Satur 2004).

L'île du Pont de la Batte

Des travaux de dévégétalisation de la jeune saulaie et peupleraie ont été réalisés sur l'île du Pont de la Batte. L'objectif étant de remobiliser les sédiments et maintenir une zone herbacée. L'intervention s'est étalée sur une surface de 300m sur 25m et, deux parcelles de 100m sur 75m.

Les travaux réalisés en 2010 concernent l'entretien de la levée (élimination de la végétation) et l'ouverture du chenal (E).



Photo 4. Site atelier de La Charité, travaux de dévégétalisation réalisés en 2010 sur la levée, suppression de la végétation arborée (source : Fouzi Nabet 2010).

Tableau 5. Synthèse des interventions de restauration réalisées dans le site de la Charité-sur-Loire

Site	Année	Zone restaurée	Objectif
	1994	la chevette	restauration
	2001	la chevette	restauration
La Charité	2002	bras en rive gauche (aval du pont)	réactivation
	2003	bras en rive gauche	réactivation
	2004	bras en rive gauche (aval du pont)	réactivation
	2005	bras en rive gauche (aval du pont)	réactivation
	2006	bras en rive gauche (aval du pont, passy)	réactivation
	2010	la levée	entretien
	2010	bras rive gauche (chenal E partie aval)	réactivation

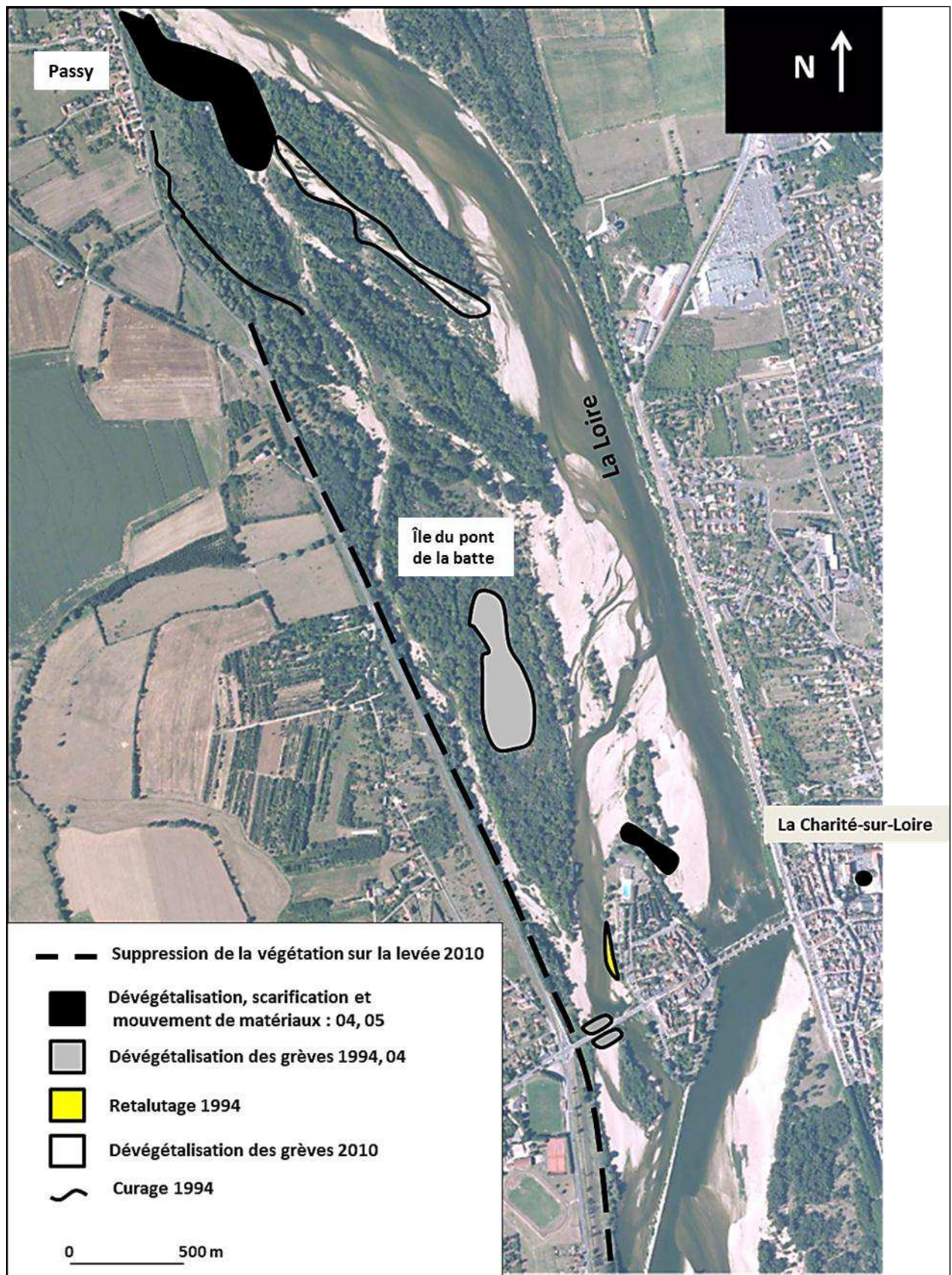


Figure 32. Site atelier de La Charité-sur-Loire, typologie des travaux de restauration et entretien réalisés dans le lit mineur (source : F. Nabet, 2006 modifiée, image aérienne 2005)

**Zones d'interventions retenues sur le lit mineur de la Loire
sur les communes de la Charité sur Loire (58) et de la Chapelle Montlinard (18)**

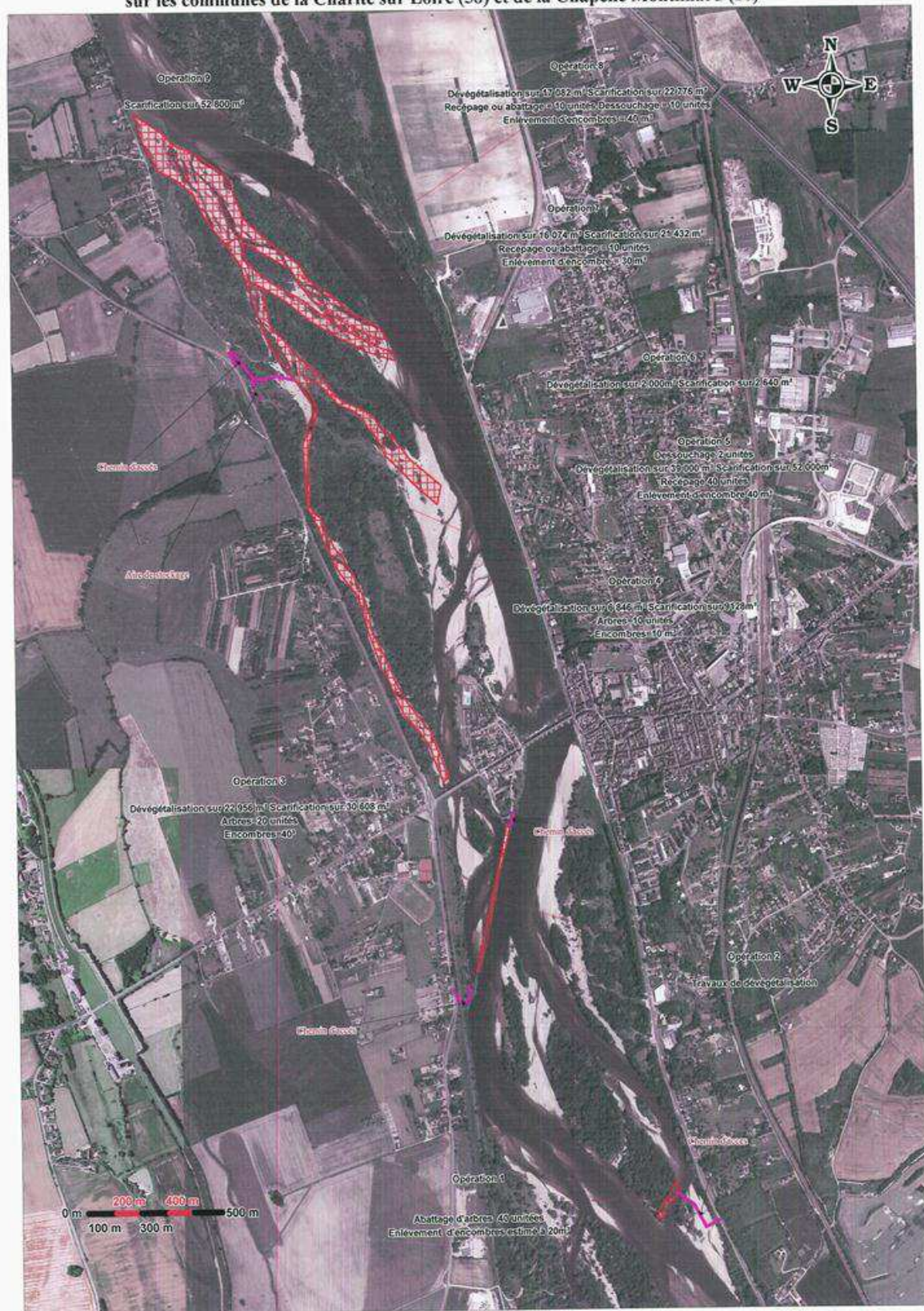


Figure 13. Les secteurs retenus pour faire l'objet de travaux de restauration et d'entretien, site atelier de La Charité-sur-Loire (source : DDT 58).

Nevers, le 18 janvier 2010
Communiqué de presse

Informations sur les travaux de restauration du lit de la Loire à La Charité sur Loire et La Chapelle Montlinard

Dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature (PLGN), la DDT de la Nièvre a programmé une opération de restauration du lit de la Loire sur le site de La Charité sur Loire et La Chapelle Montlinard.

Limiter l'impact des crues

Ce site a fait partie des premiers chantiers expérimentaux d'entretien et restauration du lit en Loire. Les travaux qui doivent s'engager dans les jours prochains s'inscrivent dans la continuité des interventions réalisées depuis 1994.

L'opération vise à maintenir "ouvert" le milieu ligérien en aval de l'île du Faubourg et permettre la réactivation des chenaux secondaires. Dans un deuxième temps une intervention sera réalisée en amont du Pont de Loire pour permettre le renforcement de l'écoulement dans le bras droit de la Loire.

Cette opération, supprimant la végétation dans les canaux secondaires, permettra d'assurer un maximum d'hydraulicité de la Loire en cas de crue dans cette zone sensible et habitée..

Les récentes crues de 2003 et de l'an passé nous rappellent qu'il faut rester vigilant.

Tenir compte de la valeur environnementale du site

Le secteur est situé en zone Réserve Naturelle et NATURA 2000, nous avons donc mandaté un bureau d'études spécialisé afin qu'il réalise un état initial environnemental et un impact des travaux sur le milieu naturel.

Cette étude d'impact réalisée par Egis EAU a été soumise aux acteurs locaux ayant un lien avec l'environnement (animateur NATURA 2000, ONEMA, Réserve Naturelle) et les mesures proposées par le bureau d'études pour atténuer l'impact des travaux sur le patrimoine naturel seront mises en œuvre (préservation des zones de frais, conservation des terrier-huttes de castor et des vieux Peupliers Noirs...).

En tenant compte des précautions édictées, y compris le choix d'une date d'intervention située en dehors des périodes de reproduction, on peut dire que l'impact sera limité car la flore et la faune ligérienne sont par nature adaptées à la mutation de ces espaces, équivalent au nettoyage de très grandes crues.

Déroulement des travaux

Cette opération, autorisée au titre de la Loi sur l'eau le 30 novembre 2009, consiste à faire réaliser par une entreprise privée (Société ETC) plusieurs travaux. En aval, la mise en place d'un pont cadre permettra d'accéder aux chenaux secondaires. Là, aura lieu l'abattage d'arbres, l'enlèvement d'encombres et le débroussaillage avant scarification des chenaux. Dans un deuxième temps une intervention en tête de l'île de Voluray est prévue. Enfin, la suppression de la végétation de la chevette devra être réalisé.

Ces travaux sont co-financés par l'Etat ainsi que les régions Centre et Bourgogne.

Figure 34. Communiqué de presse relatif aux travaux de restauration du site de La Charité-sur-Loire (source : DDT 58).

4.1.2 Les travaux réalisés dans le site de Mesves

Les travaux d'entretien ont eu lieu en 2004, ces derniers sont moins importants comparés aux travaux réalisés dans le site de La Charité-sur-Loire. Les actions d'entretien ont eu lieu en aval rive droite de l'île dite «des barreaux». Elles consistaient à un abattage d'arbres, enlèvement d'encombres et débroussaillage. La végétation concernée est la jeune

saulaie et peupleraie ayant colonisés un atterrissement au sein du bras secondaire localisé au niveau de l'île. Une scarification est réalisée immédiatement après la dévégétalisation. Les végétaux arrachés sont brûlés sur place sur un lieu défini en concertation avec les différents gestionnaires.

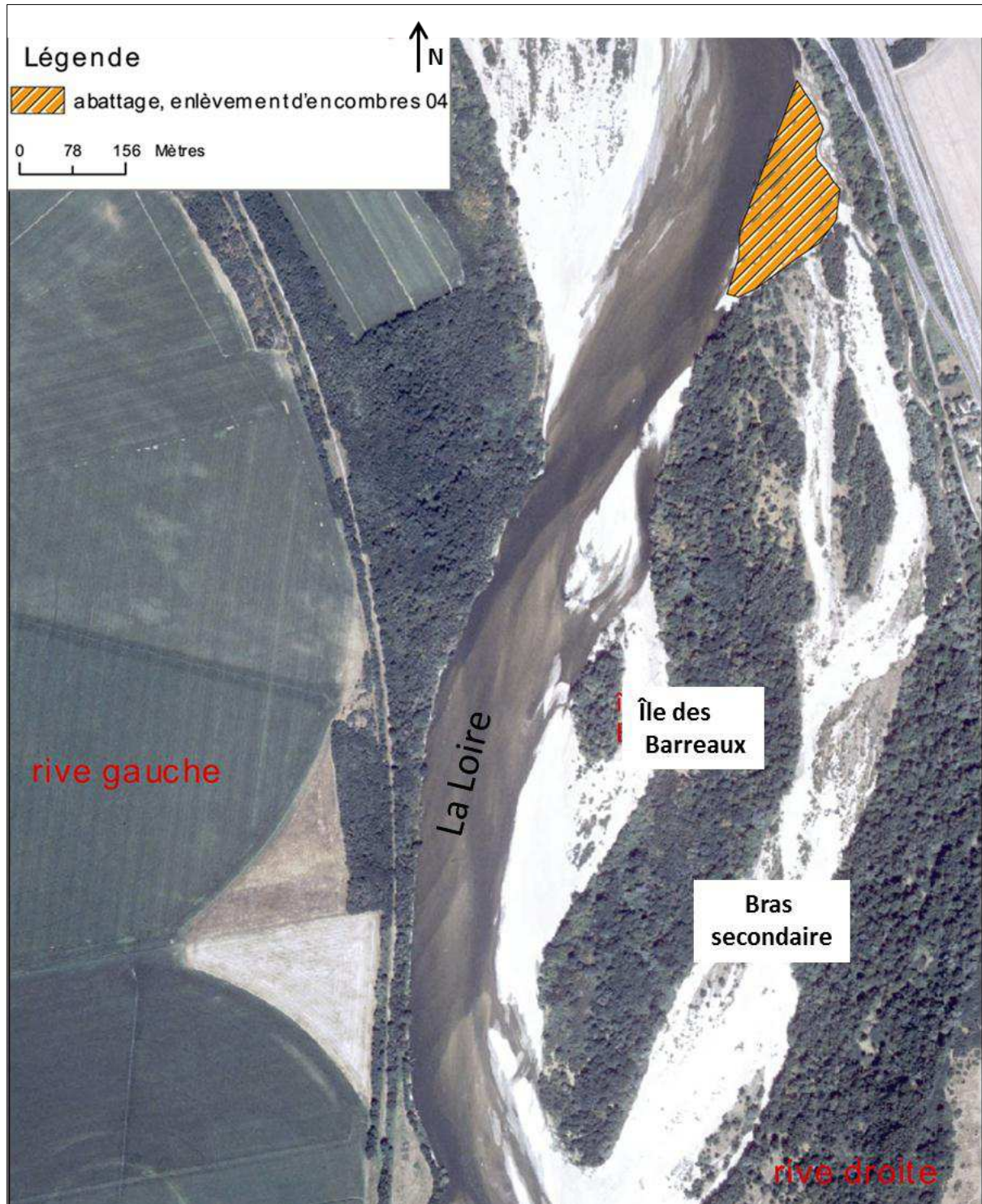


Figure 35. Site atelier de Mesves, typologie des travaux de restauration et entretien réalisés dans le lit mineur (source : F. Nabet, 2006 modifiée, image aérienne 2005)

4.1.3 Les travaux réalisés dans le site atelier de Guilly

Les travaux de restauration réalisés dans le site de Guilly consistaient à une mise en place de palplanche au niveau des berges concaves (à Bouteille et ...), ce renforcement de la levée est réalisé en 1997, 1998 et 2001. Les travaux de dévégétalisation et d'enlèvement d'encombre concernaient les têtes des îles de Saint Benoit et des Bouterons ainsi que le banc de convexité situé au niveau de l'île des Maïs. Les objectifs de ces travaux sont la protection de la levée et la remobilisation des accumulations sédimentaires formées au niveau des îles.

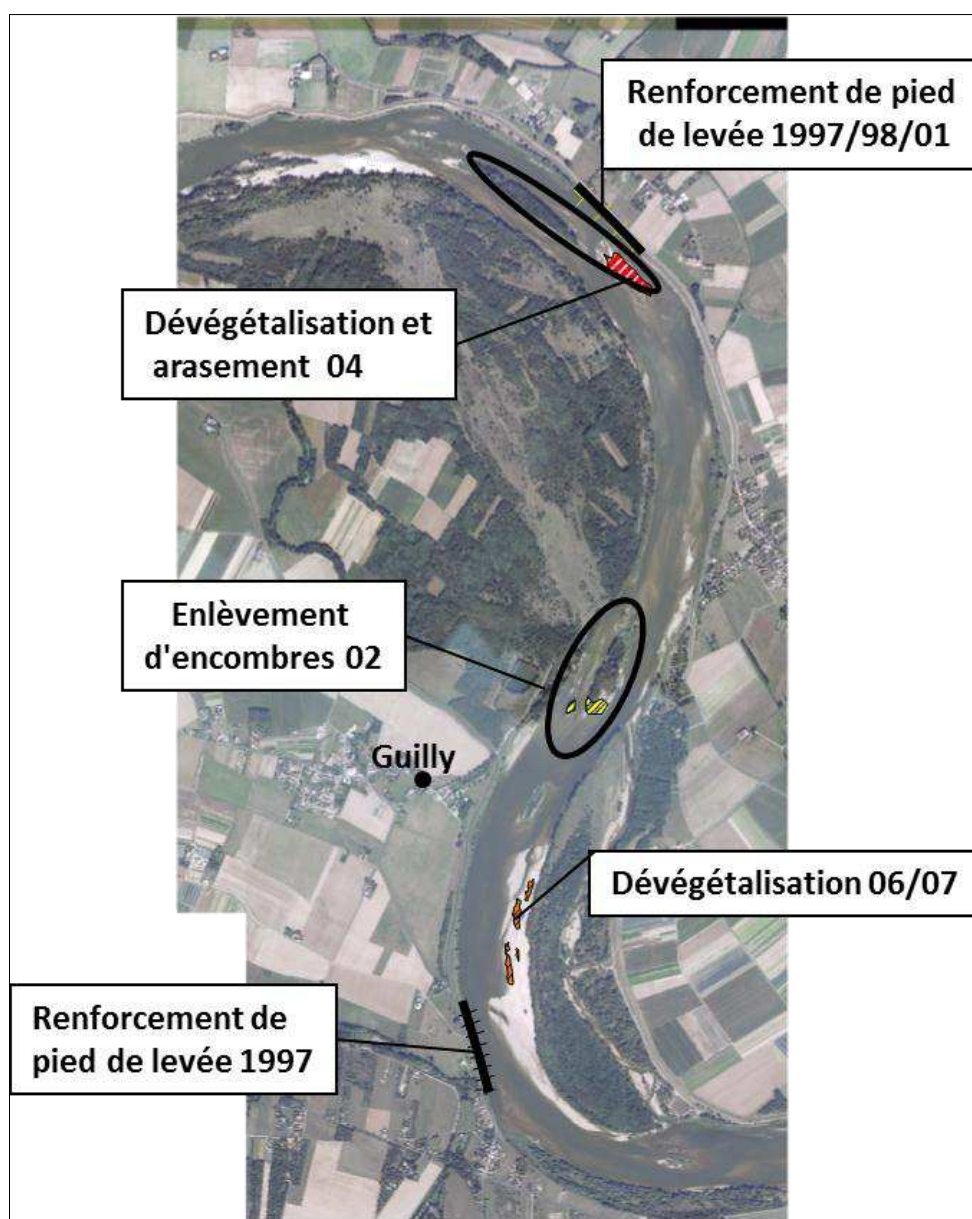


Figure 36. Site atelier de Guilly, typologie des travaux de restauration et entretien réalisés dans le lit mineur (source : F. Nabet, 2006 modifiée, image aérienne 2005)

Conclusion

Le Loire et ces espaces associés ont été depuis fort longtemps le support physique des différentes actions anthropiques : édifice religieux, transport (pont et quai), navigation (digue, épis, chevette et port), agriculture et production d'énergie (centrales nucléaires, barrage). Ces différents aménagements pèsent sur la dynamique fluviale, ils constituent des éléments nouveaux agissants en permanence sur les paramètres physiques et esthétiques du cours d'eau. Les activités économiques développées autour du fleuve contribuent au façonnement du paysage. Ce dernier traduit les interventions des sociétés (Pinchemel, 1992 *in* Piégay, 1998). Certains de ces vestiges subsistent toujours sur le terrain et participent à différents degrés à la dynamique fluviale. On s'intéresse dans cette analyse au lit entre levée et en particuliers aux interactions des aménagements avec les autres composantes de cet espace fluvial (chenaux, bancs, végétation...). Associer aux fluctuations climatiques, les actions anthropiques participent de façon significative à la métamorphose des formes fluviales au sein du lit mineur.

La restauration du lit de la Loire est une tâche difficile. Elle nécessite une intervention au sein d'un système dynamique et en évolution permanente. Ce système est marqué aussi par des modifications anthropiques (barrage, digue, extraction de sable). Les actions de restauration doivent prendre en compte le fonctionnement globale de l'hydrosystème, à savoir : La vitesse d'évolution de la végétation, les caractéristiques granulométrie du stock sédimentaire, la topographie et la variation des débits. Hormis les travaux réalisés en 1995 à la Charité sur Loire, on distingue au sein de nos sites d'étude deux périodes d'interventions, la première concerne les interventions ayant eu lieu entre 2000 et 2003 (à La Charité-sur-Loire) et entre 1997 et 2001 à Guilly. Ces dernières visaient plus la restauration des ouvrages (digue, chevette). La seconde période (2003-2006) concerne les intervenants ayant pour objectif la restauration du lit, c'est à dire l'ouverture des chenaux secondaires (dévégétalisation et mouvement de matériaux). Cela afin de permettre l'expansion de la lame d'eau en cas de crue.

On remarque par ailleurs que les travaux réalisés à partir de 2003 ont été plus organisés et mieux préparés (études d'impact préalables, descriptive détaillé des travaux). Il est

important aussi de signaler le manque de cartographie précise relative aux sites d'interventions et l'absence d'intervention ou de documentation concernant la période 1996 - 2000.

Du point de vue planification des travaux, on remarque dans certain cas une irrégularité relative à la fréquence des interventions. Cela peut avoir des répercussions défavorables sur les résultats espérés par les intervenants. Les secteurs à moitié restaurés sont susceptibles de se combler rapidement (formation de bouchons alluviaux).

Par ailleurs, ces interventions réunissent deux objectifs s'inscrivant dans deux logiques opposées : la restauration des ouvrages de navigation (digues chevrettes au dans du lit mineur) et l'ouverture des chenaux secondaires. Le premier objectif favorise les processus de chenalisation (cas de Fourchambault, Charité) c'est à dire la fermeture des bras secondaires et l'engraissement des îles et le second favorise la mise en eau de ces annexes d'écoulement (à travers la réactivation des bras secondaires). Il est donc important de trouver un compromis entre aménagement et fonctionnement naturel du système fluvial. Autrement dit, préserver les ouvrages en tenant compte du fonctionnement hydrologique et écologique du fleuve.

Un recensement détaillé des éléments du paysage fluvial nous semble nécessaire, avant d'entamer l'analyse morphologique et morpho-sédimentaire (**Floch, 1996**). Cette approche consiste en une lecture du paysage en suite une définition des logiques qui conditionnent l'agencement des éléments, leur fonctionnement et leur l'évolution (**Fischesser, 1977**).

L'analyse de l'évolution morphosédimentaire et de l'impact des travaux de restauration réalisés dans nos sites ateliers sera détaillée dans les chapitres 4 et 5 de la deuxième partie.

Première partie

Chapitre 2. Cadre Méthodologique : objectifs, critères du choix des sites, méthodes et outils

Nous présentons dans ce chapitre les détails des protocoles de mesures et d'analyses mis en œuvre pour constituer notre base de données. L'analyse des données est effectuée à deux pas de temps : pluri-decenale et annuelle. L'analyse pluri-decenale est réalisée au moyen de carte, photographie aérienne et profil de la ligne d'eau. Cette approche nous a permis d'évaluer les changements de la géométrie des formes fluviales au sein du lit mineur (à l'échelle des sites d'étude) et de quantifier le rythme d'évolution verticale du plancher alluvial (à l'échelle de la Loire moyenne). L'analyse à pas de temps annuelle est réalisée aux moyens des outils suivants : un DGPS différentiel, une station totale, un échosondeur et un préleveur automatique (MES). Les résultats obtenus mettent en évidence l'évolution morpho-sédimentaire de la bande active, l'impact des travaux de restauration réalisés dans le lit mineur et l'influence de la végétation et des ouvrages fluviaux sur la dynamique fluviale. Les informations issues de ces différentes approches sont intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG) pour une exploitation optimale des données.

Introduction

L'analyse des hydrosystèmes fluviaux fait intervenir la conjonction de nombreux facteurs environnementaux, à la fois naturels, sociologiques et économiques. Comprendre le fonctionnement de ces milieux n'est donc pas possible en dehors d'études pluridisciplinaires. L'interprétation des résultats est basée sur une analyse systémique. Cette dernière ouvre un champ interdisciplinaire pour mieux comprendre la complexité du fonctionnement de hydrosystème fluvial. Nous mettons à l'amont de cette réflexion les éléments suivants :

- La logique du fonctionnement et des interactions entre les différentes composantes (L. von Bertalanffy 1968, General System Theory),
- La forme qui délimite les éléments du système,
- L'approche globale et la logique d'échanges entre les parties du système.

La compréhension du fonctionnement de hydrosystèmes ligérien constitue notre premier pas pour la mise en œuvre des actions de gestion et d'entretien du lit mineur. Cette approche permet d'adapter les interventions afin de préserver l'équilibre morphodynamique du cours d'eau. Partant de ce principe, nous avons réalisé un protocole de mesures *in situ* qui consiste à adapter aux différentes unités fluviales les outils, la fréquence et le type de mesures. Les deux unités principales sont le chenal principal et les bras secondaires. Les mesures *insitu* ont été adaptées en fonction des objectifs de la thèse et aussi du financement attribué à la réalisation de ces mesures. Une fois acquises, ces données sont associées à un raisonnement mathématique pour aboutir à une modélisation numérique du fonctionnement de la bande active (chenal principal et bras secondaires). Les connexions amont et aval des bras secondaires ont fait l'objet de mesures topographique très fine (semi de points d'une résolution métrique). Nous avons réalisé dans le chenal principal des profils transversaux et longitudinaux, ces mesures ont été renforcé par un semi de points au niveau des connexions : bras secondaire-chenal principal.

Un nombre restreint de sites a été choisi en collaboration avec l'AITL, la DDT, la DREAL et le Conservatoire des Espaces Naturels de la région Centre, entre le Bec d'Allier et

Orléans. Ces secteurs atelier font l'objet d'un suivi à échelle très fine afin de quantifier les transferts sédimentaires entre chenaux secondaires et bras principal, ce travail devant être mené en fonction des événements hydrologiques et des paramètres topographiques et sédimentaires.

Le protocole de mesures et d'analyse de données est établi pour répondre aux objectifs suivants :

- effectuer une étude approfondie en analysant les variables les plus discriminantes (la pente, la topographie, la granulométrie des sédiments, les formes fluviales, la végétation et l'hydrologie) afin d'analyser les modalités de l'évolution morphosédimentaire dans le lit mineur.
- identifier les zones de sédimentation et d'érosion
- évaluer l'impact de la végétation sur l'évolution morphodynamique de la bande active
- analyser l'impact du forçage anthropique et du changement climatique en cours sur l'évolution morphosédimentaire de la bande active.
- évaluer et optimiser les travaux de restauration au sein du lit actif : mise en oeuvre d'un protocole d'analyse applicable à l'échelle de la Loire.

Il s'agit de mettre en lumière l'existence d'un dysfonctionnement, ses causes et conséquences pour définir les propositions d'aménagement. Cela permet d'apporter des informations très demandées par les gestionnaires des travaux sur des tronçons ligériens mal connus. Ce travail s'inspire en partie des études précédemment réalisées par l'équipe du Laboratoire de Géographie Physique de Meudon. (Gautier et *al*, 2001, Woudstra, 2005, Temam, 2005 Grangeret, 2005 Ramond, 2006 Depret, 2006, Grivel, 2008, Cossalter, 2009).

Connaître les secteurs d'étude ; morphologie, dynamique et aménagement du fleuve :

cette étape consiste à rassembler toutes les informations et les observations (études, rapports, travaux de chercheurs) afin de reconstituer une base de données relative à l'évolution de l'hydrosystème fluvial. De nombreuses sources bibliographiques ont été consultées, elles permettent d'établir un protocole fondé sur un support théorique solide. Notre méthodologie s'appuie également sur des travaux et des études allant dans le sens de

nos hypothèses de bases (incision du lit, rétraction de la bande active, déficit sédimentaire...).

a. Les dimensions spatio-temporelles dans le fonctionnement fluvial, définition des échelles spatio-temporelles

La prise en compte de la dimension temporelle à plusieurs échelles emboîtées permet une analyse globale et une prise en considération du temps de réaction de l'hydrosystème aux modifications des variables indépendantes. Le pas de temps pluri décennal ou historique sert à interpréter les formes et processus morphodynamique actuels. Quant au pas de temps géologique, il explique les conditions de mise en place à l'échelle de l'hydrosystème. La genèse des formes actuelles s'explique par une analyse de paléo-processus et de processus récents. Cela facilite la compréhension des mécanismes de fourniture de la charge solide et du flux liquide contrôlant le réajustement fluvial. Trois pas de temps clés peuvent être distingués :

- l'échelle Tardiglaciaire et Holocène, renseigne sur les conditions de production et de transit de sédiments dans les vallées et met en lumière l'alternance de phase de forte et de faible activité en fonction des fluctuations d'ordre climatique.
- l'analyse à l'échelle historique, prend en compte deux éléments importants dans l'analyse des hydrosystèmes, le forçage anthropique (ingénierie moderne) et l'influence climatique du Petit Âge Glaciaire (changement des conditions hydroclimatiques) et potentiellement, l'influence du changement climatique en cours.
- l'échelle contemporaine concerne les changements en cours de l'hydrosystème. L'interprétation des processus morphodynamiques actuels nécessite la compréhension du passé géomorphologique de ces espaces.

Le choix de l'échelle temporelle dépend des objectifs de chaque étude. Dans le cas de notre travail de recherche, l'analyse des processus de l'évolution morphodynamique du lit mineur est réalisée en combinant les échelles historiques (analyser l'impact des actions anthropique) et contemporaine (analyser l'ajustement en cours du lit mineur).

Nos objectifs sont :

- effectuer une analyse diachronique, quantitative et qualitative des formes en plan au sein du lit mineur sur une période de 155 ans.
- analyser l'évolution topographique du chenal principal sur un pas de temps pluri-décennal et annuel.
- analyser l'évolution topographique des bras secondaires sur un pas de temps pluriannuel.
- Evaluer l'efficacité des travaux de restauration du lit mineur sur un pas de temps décennal et annuel.

Cette approche permet de définir des seuils à partir desquels les processus d'équilibre (érosion et sédimentation) deviennent des indicateurs de dysfonctionnement morphodynamique. La question d'ajustement du fleuve à la variation spatiale des flux liquide et solide sera abordée à une grande et moyenne échelle spatiale. La grande échelle correspond aux dimensions des connexions bras secondaires-bras principal, îles, bancs et ouvrages d'aménagement (digues, chevrette). Il sera possible de distinguer par la suite l'état et l'emprise spatiale de ces annexes d'écoulement (degré de végétation, comblement, érosion, présence d'aménagement...) et localiser avec précision les secteurs affectés par l'érosion et les zones de sédimentation. L'analyse à l'échelle spatiale moyenne concerne un tronçon d'environ 350 km en Loire moyenne (du Bec d'Allier à Saumur). Cette approche apporte des éléments de synthèse concernant l'évolution verticale du plancher alluvial. Les données utilisées sont : les lignes d'eau disponible sur le site de la DREAL Centre (base de données SIEL), des mesures bathymétriques réalisées en 1995 par le bureau d'étude Crougnaux, des mesures bathymétriques (réalisées dans le cadre de la thèse par le CETE de Blois et l'université de Chinon), des mesures topographiques que nous avons réalisés dans le cadre de la thèse sur 4 années (2008 – 2011), des mesures bathymétriques réalisées par le CETE de Blois en 2005, des mesures topographiques réalisées en 2004 dans le cadre de la thèse de S. Grivel (2008), des cartes et photographies aérienne (fournis par la DREAL Centre) couvrant une période de 155 ans (1850 – 2005), des photographies réalisées au moyen d'un ballon captif en 2009 et 2011 par Chagny, des mesures de M.E.S réalisées sur une année hydrologique et des prélèvements sédimentaires.

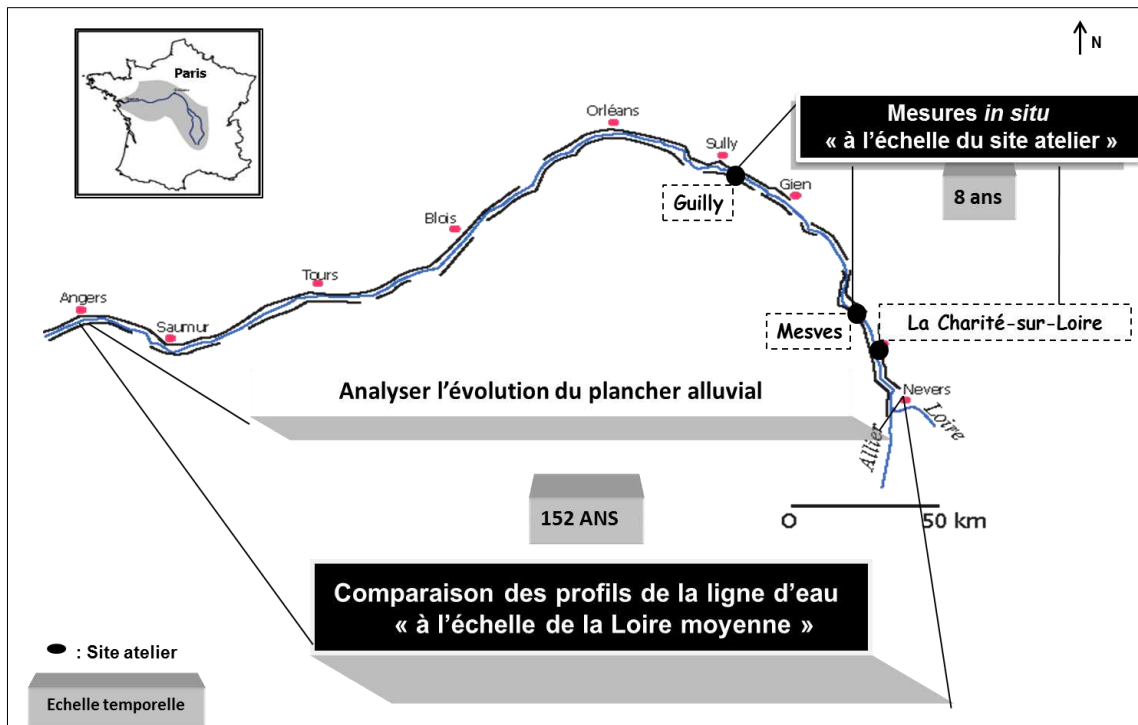


Figure 37. Emboîtement des échelles spatio-temporelles d'analyse

b. Mise au point de la méthodologie et du protocole de mesures, validation

Les données acquises, les méthodologies avaient été définies au moment du dépôt du projet de thèse. Cependant, la mise en œuvre pratique des relevés de terrain, ainsi que la mise en place de la collaboration avec le CETE de Blois et l'université de Chinon nous ont permis de préciser, de « corriger », puis de valider un certain nombre de méthodes, que nous présentons ci-après.

Deux types d'analyse sont effectués :

Des mesures topographiques et bathymétriques menées après les différents événements hydrologiques, permettant d'évaluer la remobilisation de sédiments.

Des mesures de sédiments transportés en suspension dans l'eau (M.E.S), ces mesures sont menées sur une année hydrologique à une fréquence de 2 mesures par mois et en période de crue. Les mesures issues de cette mesure renseignent sur l'évolution verticale et transversale de la concentration des M.E.S au sein d'une section transversale réalisée dans le chenal principal, elles permettent également d'estimer le volume de la charge solide transportée en suspension en fonction des débits.

Les méthodes et outils d'analyse sont définis en fonction des caractéristiques de chaque site. Cela afin d'évaluer l'efficacité géomorphologique : la remobilisation de sédiments, expliquer la capacité de réponse du lit actif à l'arrêt des extractions des granulats (l'évolution vertical du chenal principal), analyser l'ajustement en cours des formes fluviales (lit mineur) et la réponse géomorphologique des sites ayant fait l'objet de travaux de restauration.

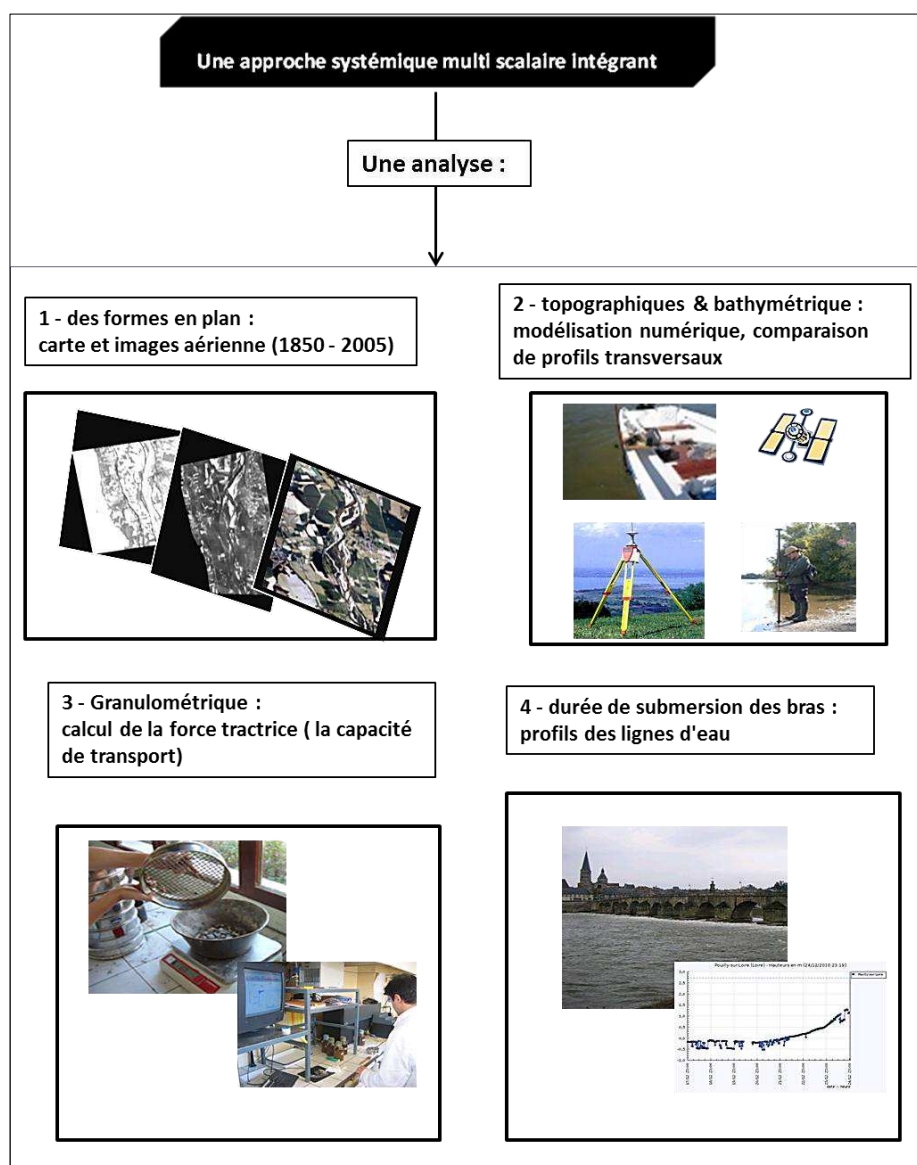


Figure 38. Synthèse du protocole de mesure et d'analyse.

Cette approche est mise en œuvre pour répondre aux objectifs suivants : analyse diachronique, quantitative et qualitative des formes en plan au sein du lit mineur sur un pas de temps de 155 ans, mesure de l'évolution topographique du plancher alluviale sur un pas de temps pluri-décennale et annuel et évaluation de l'efficacité des travaux de restauration du lit mineur sur un pas de temps décennal et annuel.

Analyse diachronique pluri-décennale

1.1 Les données sources et leurs traitements

1.1.1 Cartes et photographies aériennes (1850 – 2005)

Les cartes et les photographies aérienne sont disponibles sur le site internet de la DREAL Centre (base de données SIEL). La carte la plus ancienne que nous avons utilisé est celle de 1850, dite Carte de « Coume », levée à la suite de la crue de 1846. Ce document permet de prolonger le pas de temps d'analyse à 155 ans, (fournit une vision sur la morphologie du lit et l'agencement des unités fluviales) et de mettre en évidence l'influence des aménagements (digue, quai, chevrette, pont) sur l'évolution en plan des formes fluviales. Les images aériennes utilisées datent de 1932, 1957, 1969, 1984, 1995, 2002 et 2005.

Notre objectif est de mettre en évidence les indicateurs géomorphologiques suivants :

- les variables indicatrices de la dynamique hydro-morphologique : évolution spatiale de la bande active et de la bande végétalisée, le nombre des bras secondaires et des îles, la typologie du couvert végétal ;
- la variabilité et la mobilité spatiale des mosaïques fluviales et végétales ;
- la relation entre dynamique fluviale et dynamique végétale ;
- l'influence des aménagements sur la dynamique morpho-sédimentaire ;
- l'impact du déficit sédimentaire (aggravé par les extractions de granulat) sur la géométrie du lit.

Cette approche permet d'identifier les variables considérées comme indicateurs pertinents dans l'analyse de la dynamique des formes fluviale et de caractériser les unités constituant le lit mineur (bras, île, franc-bord et aménagement), d'analyser leur mode d'évolution spatio-temporelle et de cartographier les secteurs d'érosion et de sédimentation. Ces documents représentent par ailleurs un support nécessaire pour interpréter les résultats issus des études topographiques et granulométriques.

Les résultats obtenus sont mis en relations avec les résultats de l'analyse des profils en long de la ligne d'eau concernant la 2^{ème} moitié du 19^{ème} siècle. Cela afin de mettre en évidence

l'ajustement des formes fluviales suite aux extractions massives de granulats dans le lit mineur de la Loire.

Tableau 6. Liste des supports iconographiques utilisés dans le cadre de la thèse.

Année	Fonds iconographiques
1850	Carte topographique (fond DREAL)
1932	Carte topographique (fond DREAL)
1957	Photographie aérienne (fond DREAL)
1969	Photographie aérienne (fond DREAL)
1984	Photographie aérienne (fond DREAL)
1995	Photographie aérienne (fond DREAL)
1997	Photographie aérienne (fond DREAL)
2002	Photographie aérienne (fond DREAL)
2005	Photographie aérienne (fond DREAL)

Les photographies aériennes sont réalisées à une échelle de 1/25000.

L'application de la méthode SIG (Système d'Information Géographique)

Un système d'information géographique (SIG) est un système d'information capable d'organiser et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées, ainsi que de produire des plans et des cartes. Ses usages couvrent les activités géomatiques de traitement et diffusion de l'information géographique. La représentation est généralement en deux dimensions, mais un rendu 3D ou une animation présentant des variations temporelles sur un territoire sont possibles. L'usage courant du système d'information géographique est la représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial en se basant sur des primitives géométriques : points, des vecteurs (arcs), des polygones ou des maillages (raster). À ces primitives sont associées des informations attributaires telles que la nature (route, voie ferrée, forêt, etc.) ou toute autre information contextuelle (nombre

d'habitants, type ou superficie d'une commune par ex.).Le domaine d'appartenance de ce type de systèmes d'information est celui des sciences de l'information géographique.

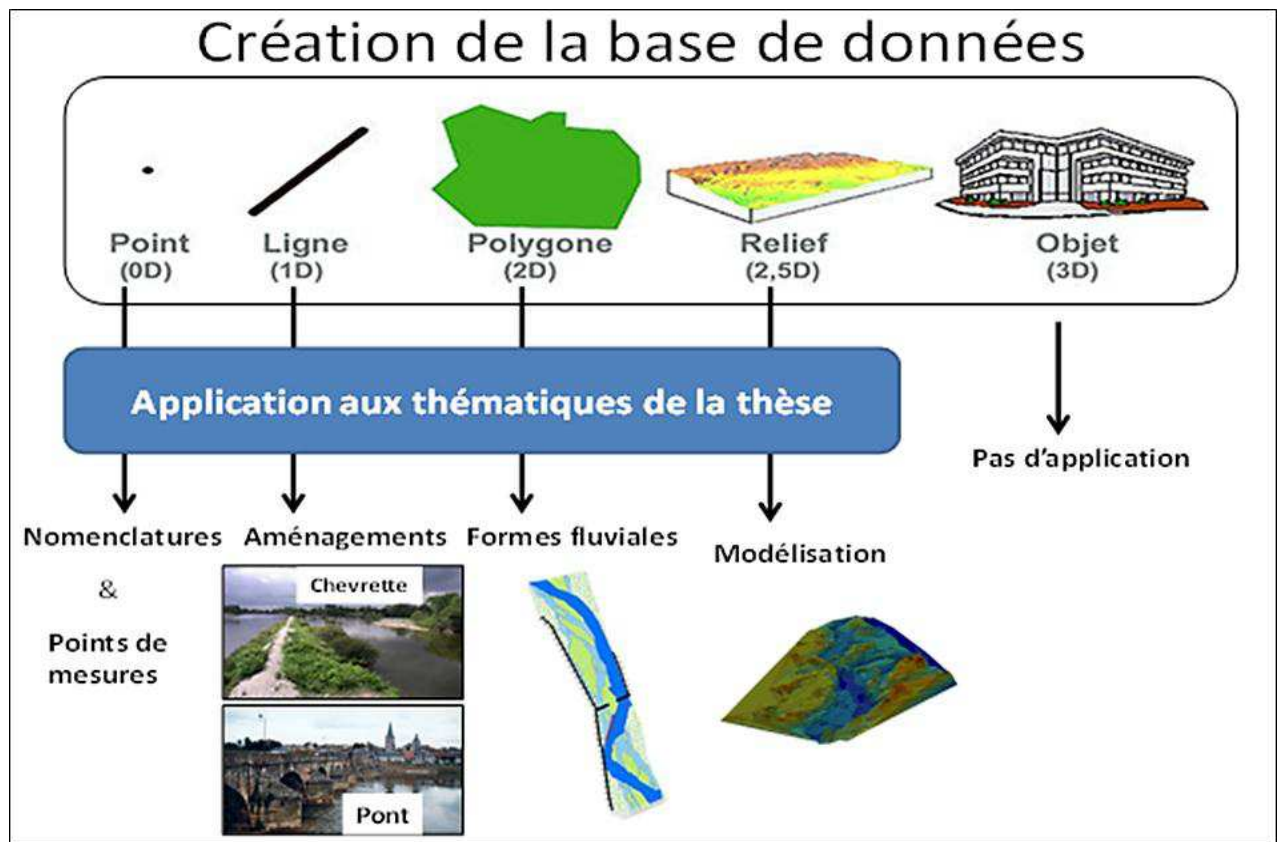


Figure 39. Exemple de créations de la base de données, site atelier de La Charité-sur-Loire

Le traitement des données est effectué en plusieurs étapes :

La numérisation des sites d'étude, cette étape est assez longue et doit être menée avec beaucoup d'attention et de prudence. Nous avons effectué pour les trois sites ateliers (La Charité-sur-Loire, Mesves et Guilly) un zonage sous forme de polygones pour délimiter les différentes unités au sein du lit mineur (bras principal, île, berge, bras secondaire, chevrette, pieux, levées, point durs artificiels...). Cela permet d'identifier les composantes du paysage fluvial et de les localiser avec précision

La seconde étape consiste à calculer la superficie des polygones relatifs aux unités fluviales. Ces polygones sont caractérisés par la suite dans un tableau d'attribution renseignant le type de forme, sa surface et son périmètre. Ce tableau représente l'élément de base à partir duquel on constitue toutes les couches thématiques. Il permet également d'effectuer des opérations mathématiques en fonction des besoins de l'utilisateur. Les unités fluviales « naturelles » sont divisées en deux catégories de formes :

- *Les formes mobiles* : Chenal principal, chenal secondaire, bancs.

- *Les formes végétalisées* : Îles, îlots, francs-bords.

La troisième étape est l'extraction des valeurs numériques relatives aux superficies des différentes formes fluviales (du tableau d'attribution) et le traitement sous Excel : les données sont représentées sous forme de graphes et histogrammes afin de faciliter l'analyse. Nous avons utilisé 7 codes pour identifier les différentes formes fluviales. Le rythme d'évolution de la végétation est également pris en compte. Cette approche facilite l'identification des zones clés pour optimiser les travaux de restauration (ex. : suivi de l'évolution de la végétation au sein des connexions des bras ou au niveau des têtes et queues des îles). Les informations issues de cette analyse sont confrontées avec les résultats de l'évolution topographique (MNT, profils topographiques). Cela afin de mettre en évidence le rôle morpho-sédimentaire du couvert végétal.

Tableau 7. Attribution de codes aux différentes unités fluviales.

Code	Unité fluviale	Mesures effectuées
1	Île	Superficie, périmètre
2	Île artificielle	Superficie, périmètre
3	Franc-bord	Superficie, périmètre
4	Chenal principal	Superficie, périmètre
5	Chenal secondaire	Superficie, périmètre
6	Espace en cours de végétalisation	Superficie, périmètre, hauteur moyenne
7	Végétation isolés	Superficie, périmètre, hauteur moyenne

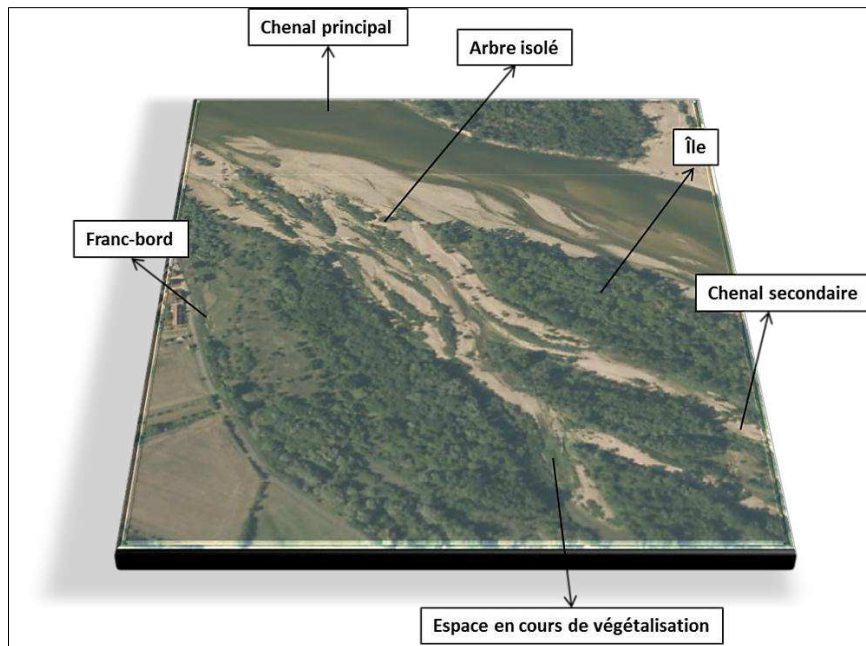


Figure 40. Identifications des unités fluviales.

Chenal principal : en eau toute l'année, section où transitent plus des deux tiers du débit.
Chenal secondaire : section où transitent du débit. *Île*, *Franc-bord*, *Espace en cours de végétalisation* : végétation pionnières (stade herbacé).

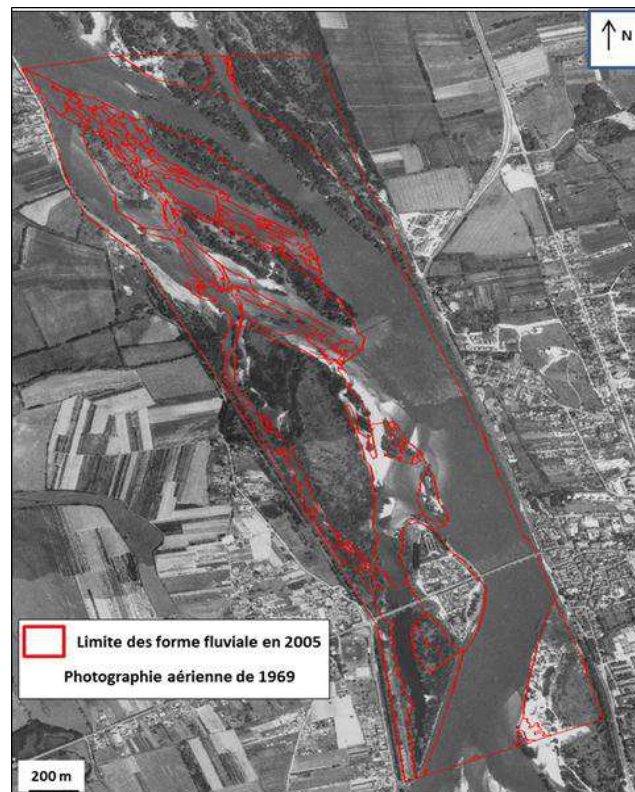


Figure 41. Exemples de comparaison des formes fluviales (1969 -2005).

Superposition de la couche « formes fluviale » de l'année 2005 sur l'image aérienne de 1969. Cette technique permet de suivre l'évolution spatio-temporelle des formes fluviales.

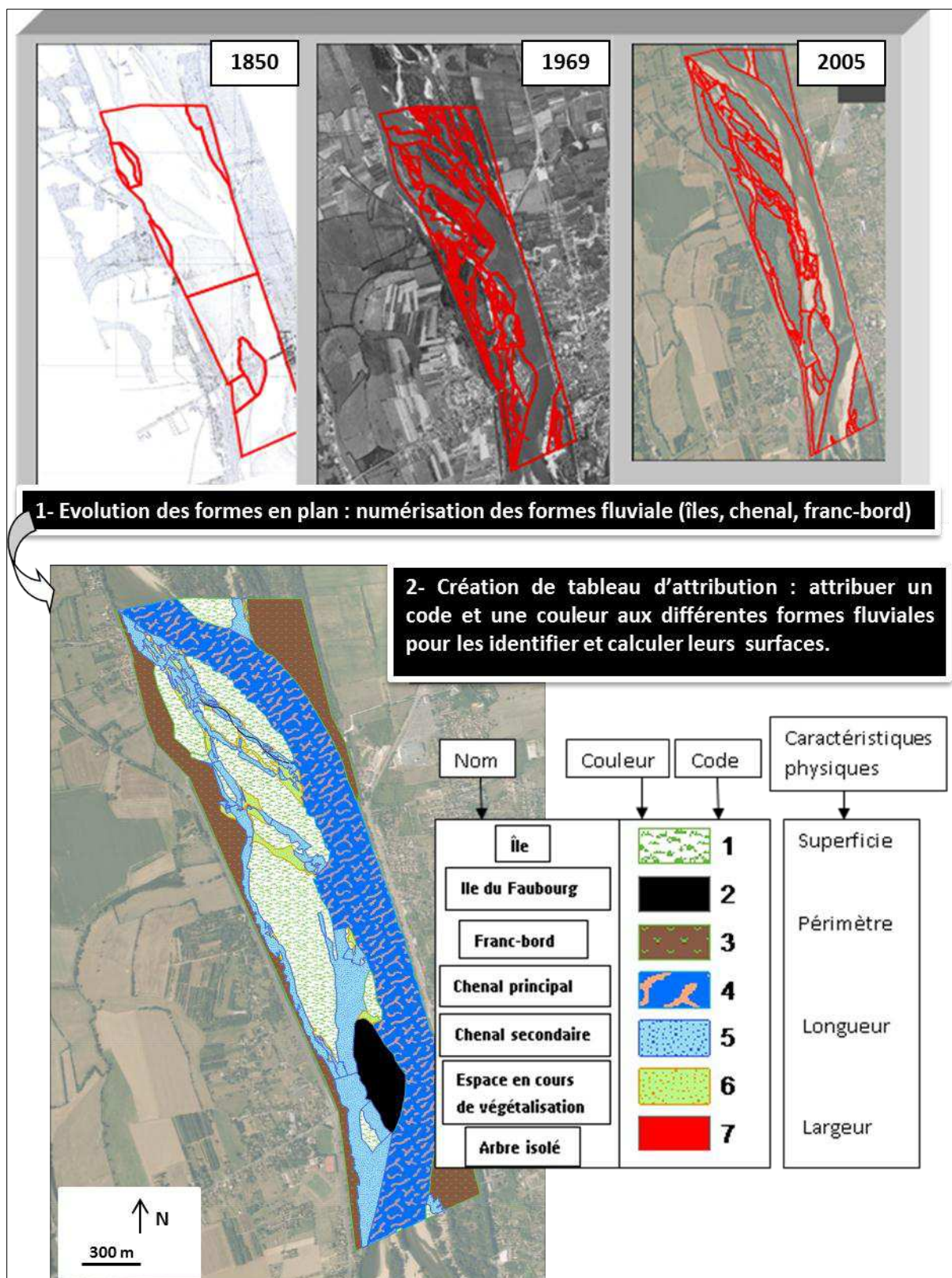


Figure 42. Exemples de numérisation des unités fluviales (constitution de la base de données).

1.1.2 Les profils en long de la ligne d'eau

L'objectif de cette approche est d'analyser l'évolution verticale du plancher alluvial à l'échelle de la Loire moyenne. L'évolution longitudinale de la surface de l'eau témoigne des modifications de la morphologie fluviale. Il s'agit d'analyser les lignes d'eau relevées en période de basses eaux (profil très proche de la topographie du plancher alluvial). Les différentes études menées sur la Loire à ce sujet mettent en évidence une tendance d'incision du chenal principal (Babonaux, 1971 ; Gazowski, 1994 ; Gautier *et al.*, 2001 ; Gautier et Grivel, 2006). Cette information est d'un intérêt majeur, l'enfoncement du lit mineur s'accompagne d'un abaissement du toit de la nappe, cette dernière se déconnecte des autres annexes hydrauliques (bras secondaires, boires...), la mise hors eau des bras secondaires favorise le développement de la végétation et le dépôt de sédiments. Le renouvellement des eaux n'est donc plus assuré par la nappe, ce qui favorise les processus d'assèchement des zones humides.

La base de données des cotes altimétrique de l'eau a été créée en 1988 par le service hydrologique centralisateur de Bassin qui s'est chargé de rechercher les anciennes échelles hydrométriques installées tout au long de la Loire suite à la crue de 1846. En raison de ses insuffisances, ce réseau a été complété à partir de 1994 en partenariat avec l'Institut Géographique National (IGN). Deux cents sites choisis pour leur intérêt hydraulique, espacés de 2 à 3 km, sur les deux rives du cours d'eau, font désormais l'objet de relevés et d'observations régulières de la cote altimétrique de l'eau. Sont ainsi suivis la Loire depuis le barrage de Villerest, l'Allier depuis Brioude, une partie du Cher, de la Creuse et de la Vienne.

Les profils ont été réalisés selon de trois systèmes de nivellements :

1- le réseau Bourdaloue : réseaux établi entre 1857 à 1864 par Paul-Adrien Bourdaloue. Le zéro altimétrique correspond au trait de 0,40 m de l'échelle de marée du Fort Saint-Jean à Marseille. Ce zéro fut appelé « zéro Bourdaloue ». Ce système concerne les profils de la ligne d'eau réalisés en 1858 et 1859.

2- Le réseau Lallemant, établi de 1884 à 1922 par Charles Lallemant. Le zéro de nivellement Lallemant dit « zéro normal » a été fixé d'après l'observation marégraphique à

Marseille du 1^{er} février 1885 au 1^{er} janvier 1897. Ces observations ont permis de déterminer un zéro correspondant à la cote 0,329 m de l'échelle de marée du Fort Saint-Jean. Il se trouve donc 71 mm au-dessous du « zéro Bourdaloue ». Ce système est pris en compte lors du traitement de profils réalisés en 1930.

3- Le réseau IGN 1969 : établi de 1962 à 1969 par l'Institut Géographique National. Ce réseau est régulièrement recalculé (calcul de compensation). Ainsi, les cotes des repères de l'IGN 69 par rapport au « zéro normal » peuvent avoir été modifiées depuis la première détermination de l'altitude des repères en 1969. Ce système concerne les profils de la ligne d'eau réalisés après 1969. La différence de ce système avec le système l'allemand est le calcul des altitudes. L'ancien système NGF était calculé avec des altitudes orthométriques (l'accélération de la pesanteur n'étant alors pas connue). A partir de 1969 (NGF-IGN69), l'altitude calculée est l'altitude normale. Ce calcul tient compte de la pesanteur g mesurée en un point (variation du champ de pesanteur à la surface de la terre).

Code	Site	REPÈRE	RIVE BRAS	Zb	PK	DZ	Altitude	DATE	HEURE	PKcartage
162	BEAUGENCY "Echelle Amont"	BEAUGENCY "Port amont" Ech	D	79,775	339,4	0,46	80,235	11/01/08	08:55	663,9
163	BEAUGENCY "Echelle Aval"	BEAUGENCY "Port aval" Ech	D	79,77	339,1	-0,07	79,7	11/01/08	09:00	664,34
165	TAVERS "Amont"	TAVERS "Amont" M	D	81,44	335,4	-3,02	78,42	11/01/08	09:15	667,88
166	TAVERS "Aval"	TAVERS "Aval" Borne IGN	D	79,725	334,1	-1,639	78,086	11/01/08	09:20	669,4
169	AVARAY "Echelle"	AVARAY Ech EDF	D	0,27	330,9	75,88	76,15	11/01/08	09:40	672,45
170	SAINTLAURENTINQUAN "Le Cavreau"	SAINTLAURENTINQUAN "Le Cavreau" Ech	G	75,18	327,9	0,06	75,24	11/01/08	09:10	675,22
171	SAINTLAURENTINQUAN "Camping"	SAINTLAURENTINQUAN "Camping" Clou	G	76,615	326	-2,284	74,331	11/01/08	09:30	677,34
172	COURBOUZON "Port de Mûdes"	COURBOUZON "Port de Mûdes" M	D	75,291	323,3	-1,965	73,326	11/01/08	10:00	679,98
174	SAINTDYES-SUR-LOIRE "Cote"	SAINTDYES-SUR-LOIRE "Cote" M	G	76,538	319,8	-4,625	71,913	11/01/08	09:45	683,61
175	COURSUR-LOIRE "Le Vivier"	COURSUR-LOIRE "Le Vivier" Ech basse	D	70,033	315,7	0,573	70,606	11/01/08	10:15	687,69
176	MENARS "Château"	MENARS "Château" Ech	D	69,12	313,1	0,845	69,965	11/01/08	10:20	690,33
177	CHALUSSE-SAINT-VICTOR (LA) "Viaduc SNCF"	CHALUSSE-SAINT-VICTOR (LA) "Viaduc SNCF" M Bas	D	70,67	310	-1,98	68,69	11/01/08	10:35	693,49

Figure 43. Exemple d'organisation des données altimétriques de la ligne d'eau (source : DREAL Centre).

Réalisés par le Service de bassin assisté par le Conseil Supérieur de la Pêche (CSP, intégré dans l'Onema par la suite) et les services locaux des DDT, ces relevés sont effectués lors d'événements hydrologiques significatifs tel que les étiages (les périodes de plus basses eaux), les modules et les crues. En crue, en particulier, les mesures sont effectuées de l'amont vers l'aval en suivant la progression du maximum de débit. Les données sont disponibles sur le site de la DREAL Centre (base de données SIEL). L'analyse des profils de la ligne d'eau réalisée à cette échelle (de la Loire moyenne) permet de :

- disposer d'éléments de synthèse pour étudier l'évolution topographique du plancher alluvial en Loire moyenne,
- placer les résultats obtenus à l'échelle des sites ateliers dans un contexte globale d'évolution du lit mineur,
- mettre en évidence l'impact des extractions de granulat sur l'évolution topographique du lit en Loire moyenne,
- Par ailleurs, l'augmentation de la ligne d'eau en crue témoigne potentiellement de l'obstruction du lit par une végétation excessive ou par des aménagements (digue, pont, d'huis...).

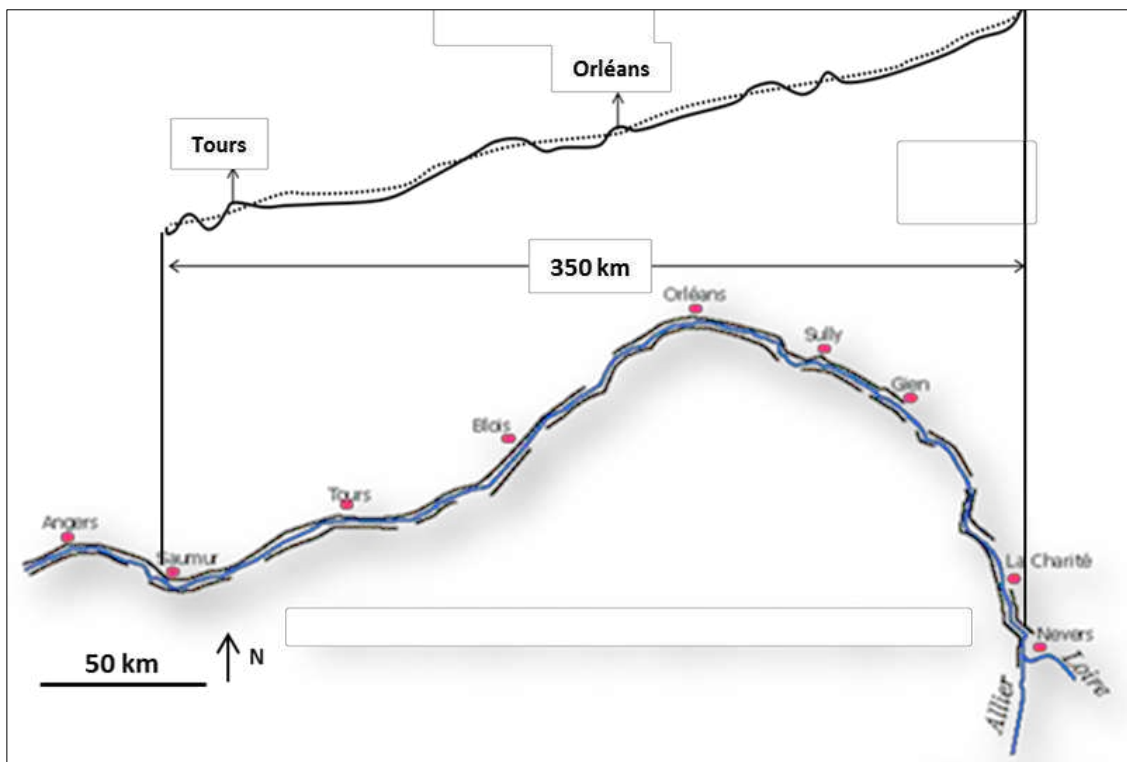


Figure 44. Exemple de comparaison de deux profils en long à l'échelle du site d'étude.

L'analyse des profils de lignes d'eau concerne un tronçon en Loire moyenne allant du Bec d'Allier à Saumur.

La partie des données qui nous intéressent concernent un linéaire de la Loire moyenne allant de Cours-les-Barre à Saumur, soit environ 350 km. L'analyse des données est effectuée sur deux pas de temps : 1978 à 2005 et 2003 à 2011 (en raison de la disponibilité des données). Le choix des années des campagnes de mesures est effectué en fonction des conditions hydrologiques (valeurs des débits lors de la réalisation des relevés de la ligne

d'eau). Les mesures de la ligne d'eau les plus anciennes disposant de valeurs de débit ont été effectuées en 1978, on considère de ce fait cette campagne de mesure comme une année de référence. Nous avons sélectionné par la suite deux autres campagnes de mesures dont les débits sont proches de ceux relevés en 1978 (égaux ou légèrement supérieur aux valeurs des débits de 1978). Les années retenues sont 1988 et 2005.

Le second pas de temps concerne la période allant de 2003 à 2011 : Les valeurs des débits de la campagne de 2011 sont inférieures à ceux des années précédemment citées, il nous est donc pas possible de comparer les données issus de la campagne de mesure de 2011 avec ceux de 1978, 1988, 2005 en raison des conditions hydrologiques différentes. Pour pallier l'effet de cette lacune et prolonger le pas de temps d'analyse jusqu'à 2011, nous avons choisi l'année 2003 qui est proche de 2005 et qui dispose de valeurs de débits relativement similaire à celles de 2011. Les profils pris en compte dans cette analyse sont tous réalisés sous le système de nivellement IGN 69. Les stations de références retenues sont : Givry, Orléans et Gien.

La technique de comparaisons diachronique des profils en long de la surface de l'eau renseigne sur l'évolution topographique du lit. Elle permet d'établir une sectorisation de zones d'abaissement et de rehaussement du profil de la ligne d'eau et déduire l'évolution verticale du fond du lit. Cependant, la fiabilité des résultats peut être influencé par de nombreux facteurs : le changement de la géométrie latérale du lit, les conditions hydrologiques, la précision des mesures (des échelles de mesure et des stations de référence) et aussi par des phénomènes locaux tel les seuils durs artificiels ou naturels. On cite à titre d'exemple le cas du site de La Charité : la comparaison des profils de la ligne d'eau réalisée entre 1978 et 1988 montre un rehaussement de 1,2 m, la remontée de la ligne d'eau est due au rehaussement du fond du chenal suite au confortement du pont de la Charité-sur-Loire et à la construction d'un radier en 1984 (Gasowski et al, 2007). Cette échelle de mesure n'est pas prise en compte dans notre analyse.

Ce qui nous intéresse dans cette analyse est la tendance générale de l'évolution du plancher alluvial à l'échelle du secteur fonctionnel. Nous avons utilisé la méthode de comparaison de profils par superposition afin de déduire le différentiel de la pente entre

des profils de différentes dates. Le changement de pentes renseigne sur les modifications topographiques du plancher alluvial.

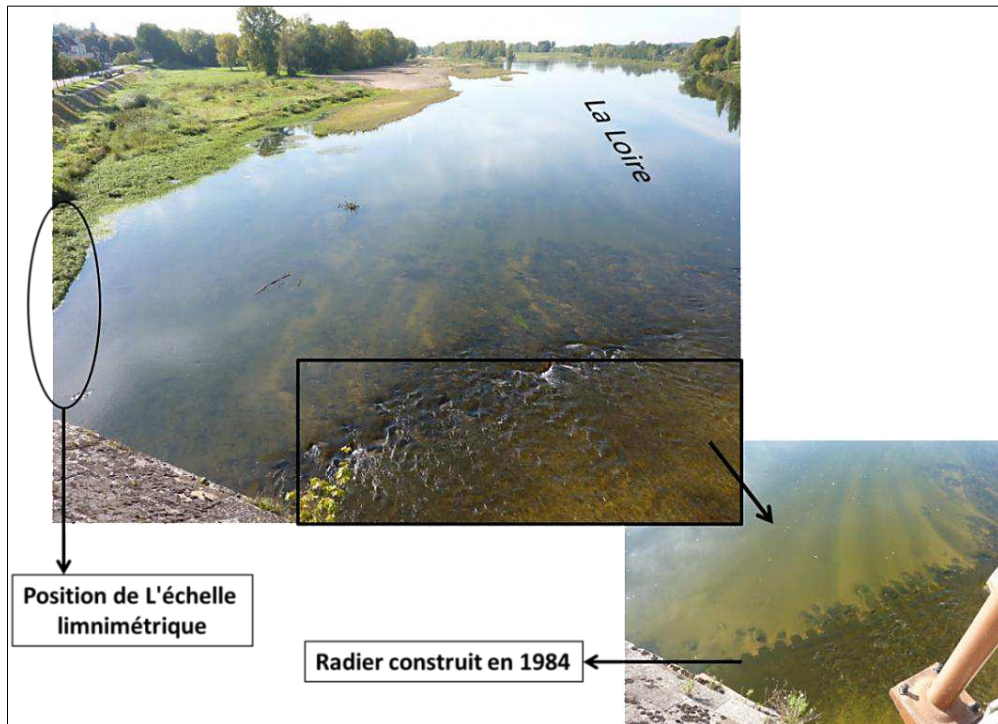


Figure 45. Localisation du radier et de l'échelle de mesure dans le site de la Charité-sur-Loire.

Influence des travaux de confortement du pont sur les résultats des mesures de la ligne d'eau.

2. Analyse diachronique pluriannuelle, *en fonction des évènements hydrologiques*

2.1 Analyse de l'évolution topographique de la bande active

Cette analyse est réalisée à grande échelle spatiale, elle permet d'effectuer un suivi détaillé de l'évolution des unités fluviales (bras principal et bras secondaires). Les campagnes de mesures sont réalisées en fonction des évènements hydrologiques. Le nombre de jours passés annuellement sur le terrain pour effectuer les mesures topographiques varie entre 40 à 45 jours pour l'ensemble des sites. Quant aux mesures bathymétriques le temps de réalisation est d'environ 15 jours pour chaque site d'étude.

2.1.1 Les Mesures topographiques

Trois campagnes de mesures ont été réalisées au sein des bras secondaires au moyen d'un DGPS différentiel de précision centimétrique (juillet –août 2008 à 2010). Nous avons réalisé des profils transversaux et longitudinaux, ainsi qu'un semi de points au niveau des connexions des bras secondaires avec la Loire (pour reconstituer un M.N.T), Le nombre de points mesurés au sein des connexions varie entre 2500 et 5000 points par campagne de mesures pour chaque connexion. La distance moyenne entre chaque point de mesure est de 1,5 m. L'exploitation de ces données a permis de modéliser l'évolution topographique des zones étudiées, de cibler les secteurs érodés et sédimentés et de calculer leurs volumes. De nombreux travaux de dévégétalisation ont été effectués au sein de ces zones de connexions « bras secondaire – bras principal », c'est pour cela que nous avons effectué dans ces secteurs un suivi topographique très fin.

Nous avons opté dans le cadre de ce travail de recherche pour la méthode dite « de positionnement relatif ». Il s'agit d'établir les coordonnées d'un récepteur en un point de mesures « inconnu » en fonction d'un autre récepteur installé en un point de référence « connu ». Cette méthode permet un réajustement des coordonnées des points inconnus par rapport au point de référence connu et par conséquent une grande précision de mesure (centimétrique). Afin d'obtenir une correction de mesure en temps réel, quatre stations de référence ont été utilisées pour couvrir le périmètre de nos sites d'étude :

Sites ateliers de La Charité-sur-Loire et de Mesves

La station n°1 : située sur le toit de l'hôpital de la ville de la Charité- sur-Loire.
Coordonnées : 4711065453 N, 300558460 E, 248.356 m

La station n°2 : située sur le toit de Pavillon du milieu de Loire à Pouilly. Coordonnées :
4717100901 N, 256592652 E, 213.625 m

Ces deux stations ont été mises en place en 2002 dans le cadre de la thèse de S. Grivel (2008).

Site atelier de Guilly

La station n°3 : située sur une borne IGN en rive gauche à au lieudit Bouteille.
Coordonnées : 310008.030 N, 596180.200 E, 114.556 m

La station n° 4 : située en rive droite au niveau du camping du village de Saint Benoit. Cordonnées : 311974.462 N, 596878.895 E, 109.931 m. cette a été mise en place en 2008 par le CETE de Blois.

Le système de référence planimétrique est le Lambert II et le système altimétrique NGF-IGN 1969 Normal.

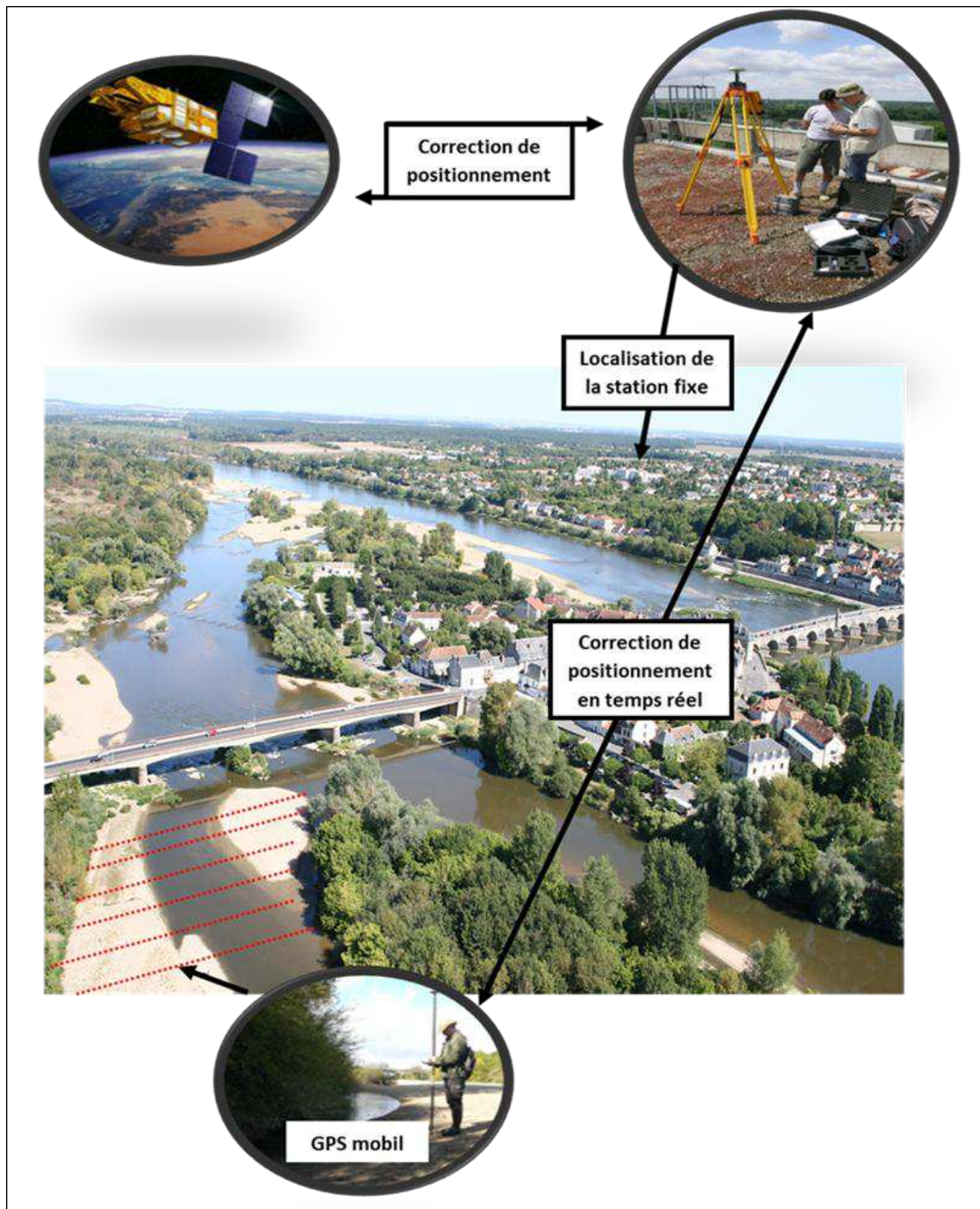


Figure 46. Principe de la mesure topographique à haute résolution altimétrique.

2.1.2 Mesures bathymétriques

Les mesures bathymétriques ont été réalisées dans le chenal principal afin de réaliser des plans topographiques de zones subaquatiques. Nous avons reconstitué à partir de ces mesures des profils transversaux et longitudinaux (dans les secteurs où les points de mesures sont distancés de plus de 20 m) et des Modèle Numérique de Terrain (dans les secteurs où les points de mesures sont réalisés à une distance inférieure à 20 m). Ce travail de terrain est complété par une osculation des berges et une inspection d'ouvrage et seuils durs (l'état des levées, l'agencement et l'emprise spatiale des artificiels et naturels).

Le matériel utilisé pour la réalisation de mesures bathymétriques est un sondeur **bi-fréquence 33-200 KHz Odom Echotrack MK III**, un DGPS cinématique **RTK Trimble 4700** et un logiciel de navigation **Hypack Max**. Le bateau pour réaliser les mesures est choisi en fonction du niveau d'eau, un pneumatique si le niveau d'eau de la Loire est bas, ou un bateau métallique lourd fortement motorisé si le niveau d'eau est haut.

Nous avons calé certain profils transversaux sur les point d'emplacement des profils réalisés en 1995 par le bureau d'étude Crougnaux dans le site atelier de Guilly et aussi sur les point de mesures bathymétriques réalisées en 2005 par le CETE de Blois dans le site atelier de La Charité-sur-Loire. Cela afin de prolonger le pas de temps d'analyse au-delà de la période des mesures définie dans le protocole de la thèse.

Les mesures les plus denses sont réalisées au niveau des connexions « bras principal-bras secondaire ». Ces secteurs sont considérés comme des éléments clés pour la compréhension des échanges sédimentaires entre le chenal principal et ces annexes d'écoulements.

La fréquence des mesures est annuelle (2008, 2009 et 2010). On dénombre au total sur l'ensemble des sites ateliers :

- 18 profils transversaux et un profil en long réalisés dans le site ateliers de La Charité-sur-Loire ;
- 8 profils transversaux et un profil en long effectués dans le site ateliers de Mesves ;
- 114 profils transversaux et un profil en long réalisés dans le site ateliers de Guilly.

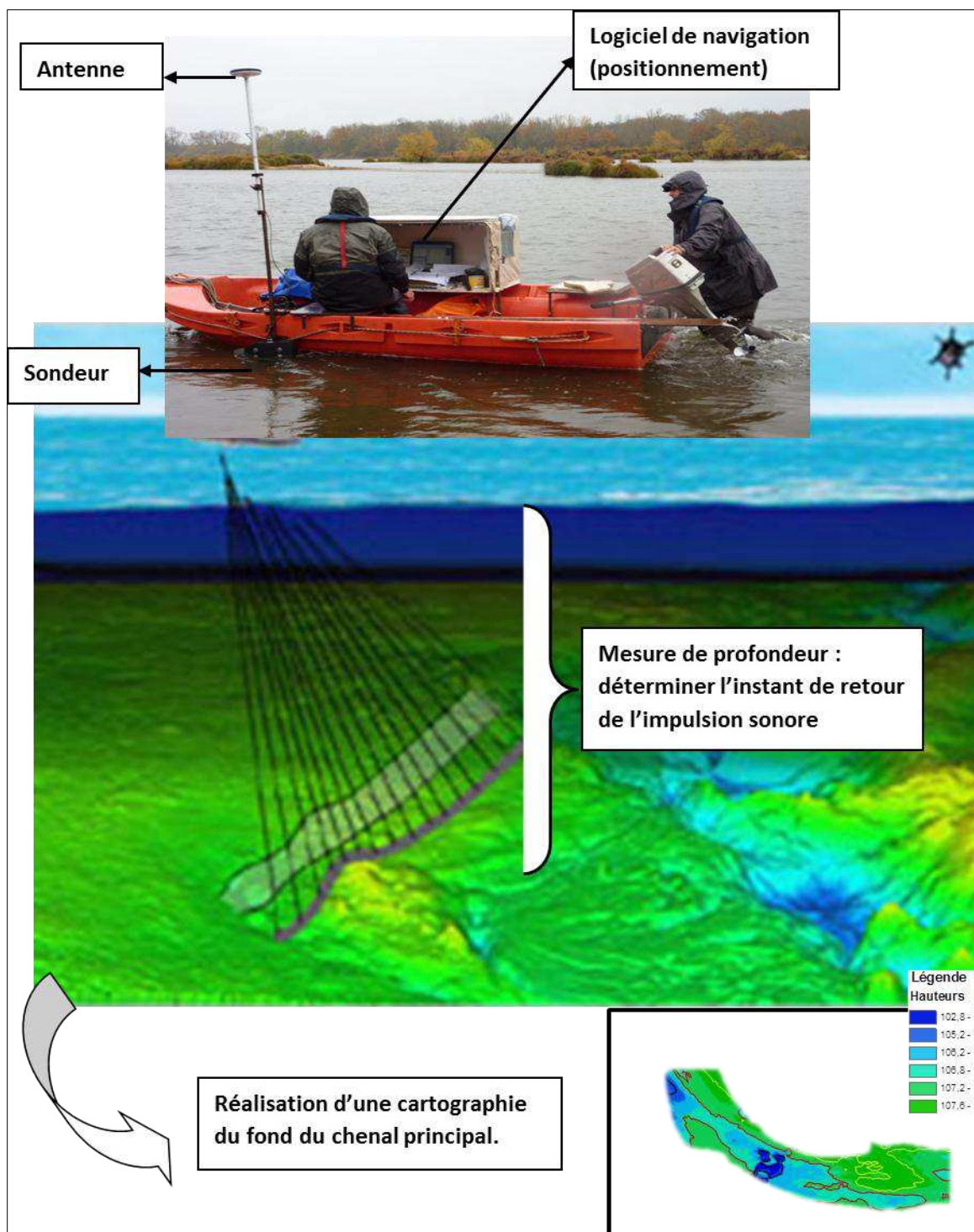


Figure 47. Principe de réalisation des mesures bathymétriques (site atelier de Guilly).

Le principe du lever bathymétrique est la conjugaison des données de plusieurs équipements sur le bateau : un système GPS, assurant le référencement « extérieur », un échosondeur décrivant la surface subaquatique, une centrale de correction des erreurs (définir le cap du bateau) et une plateforme informatique recueillant toutes les données en vue de leur traitement.

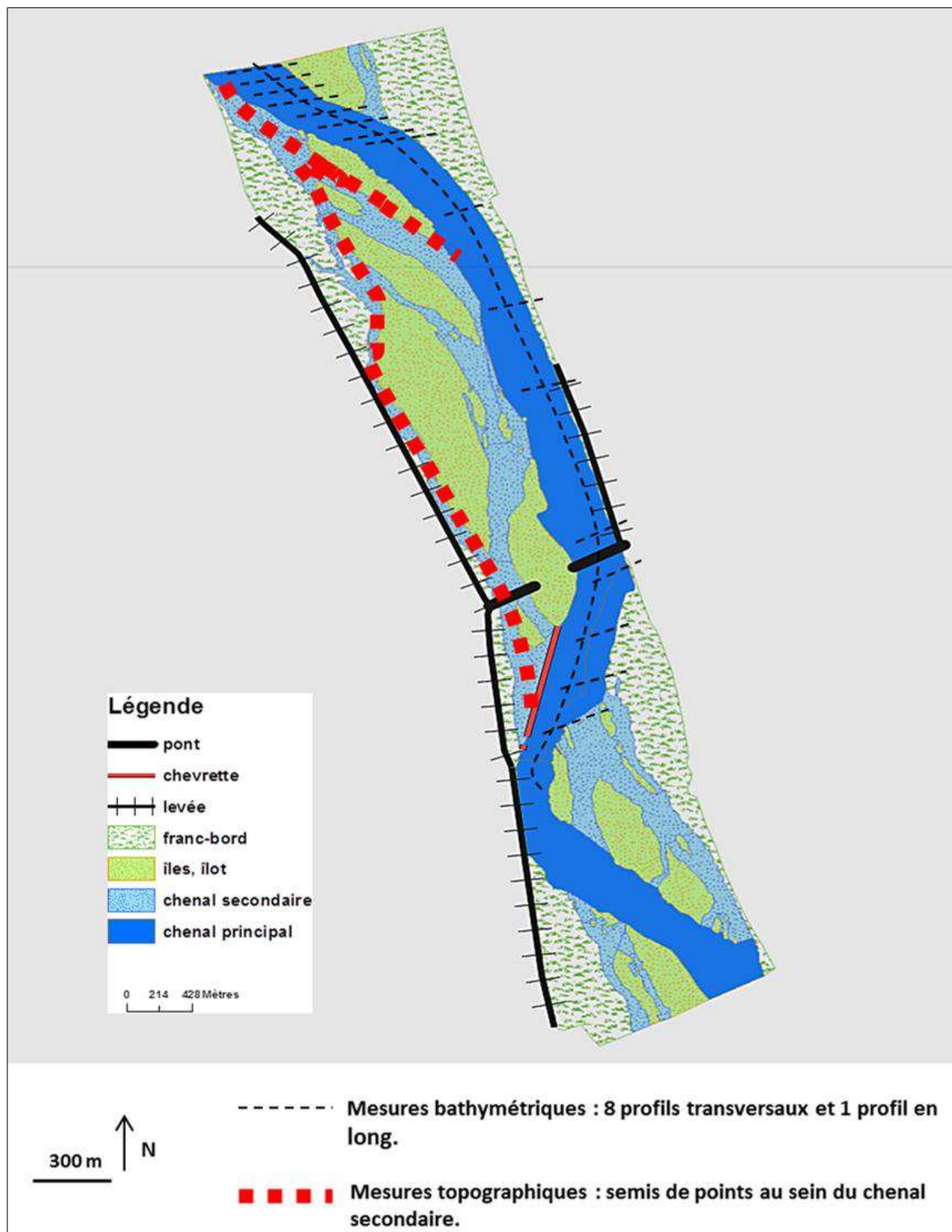


Figure 48. Protocoles de mesures bathymétriques et topographiques (site ateliers de La-Charité-sur-Loire)

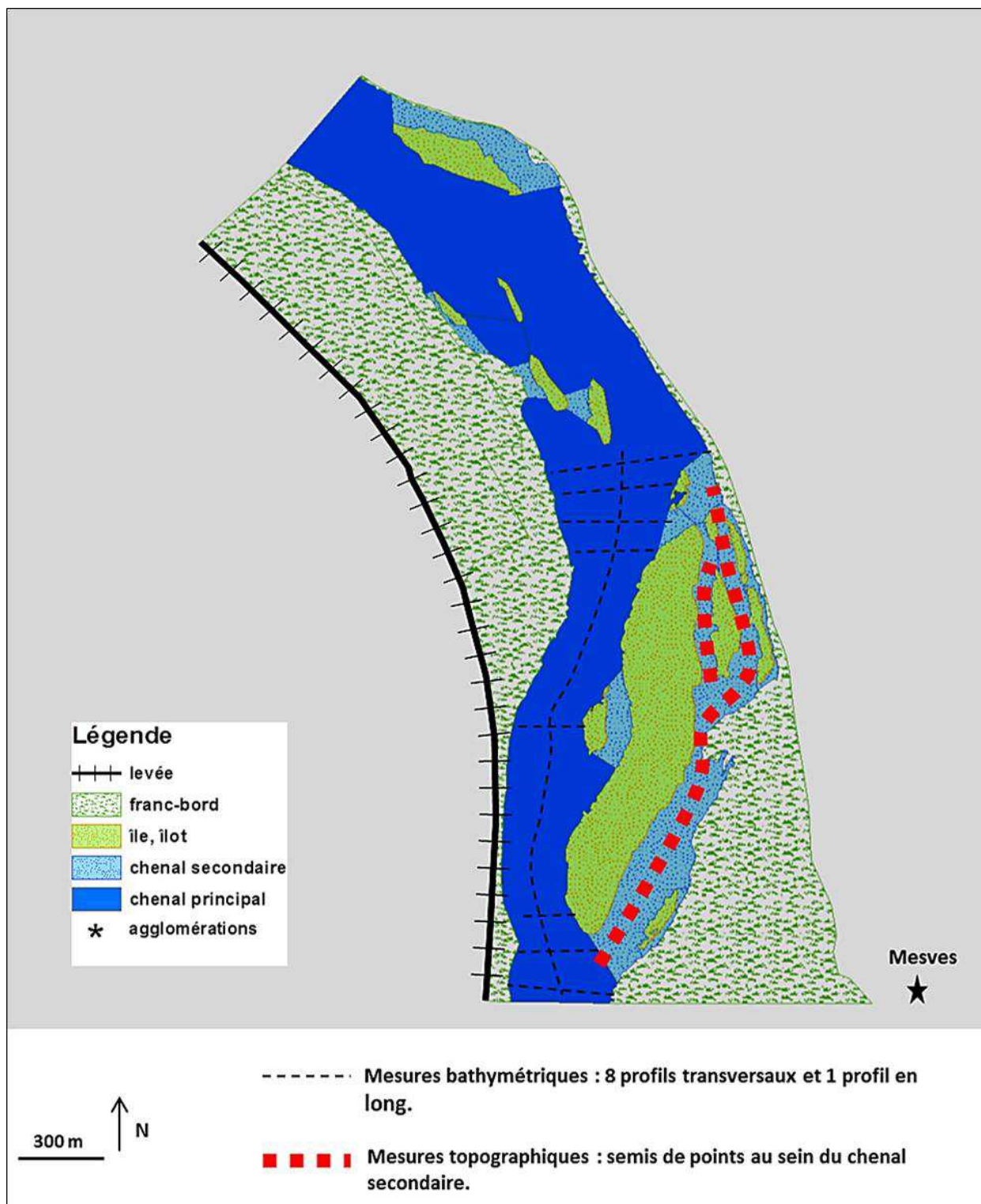


Figure 49. Protocoles de mesures bathymétriques et topographiques (site atelier de Mesves).

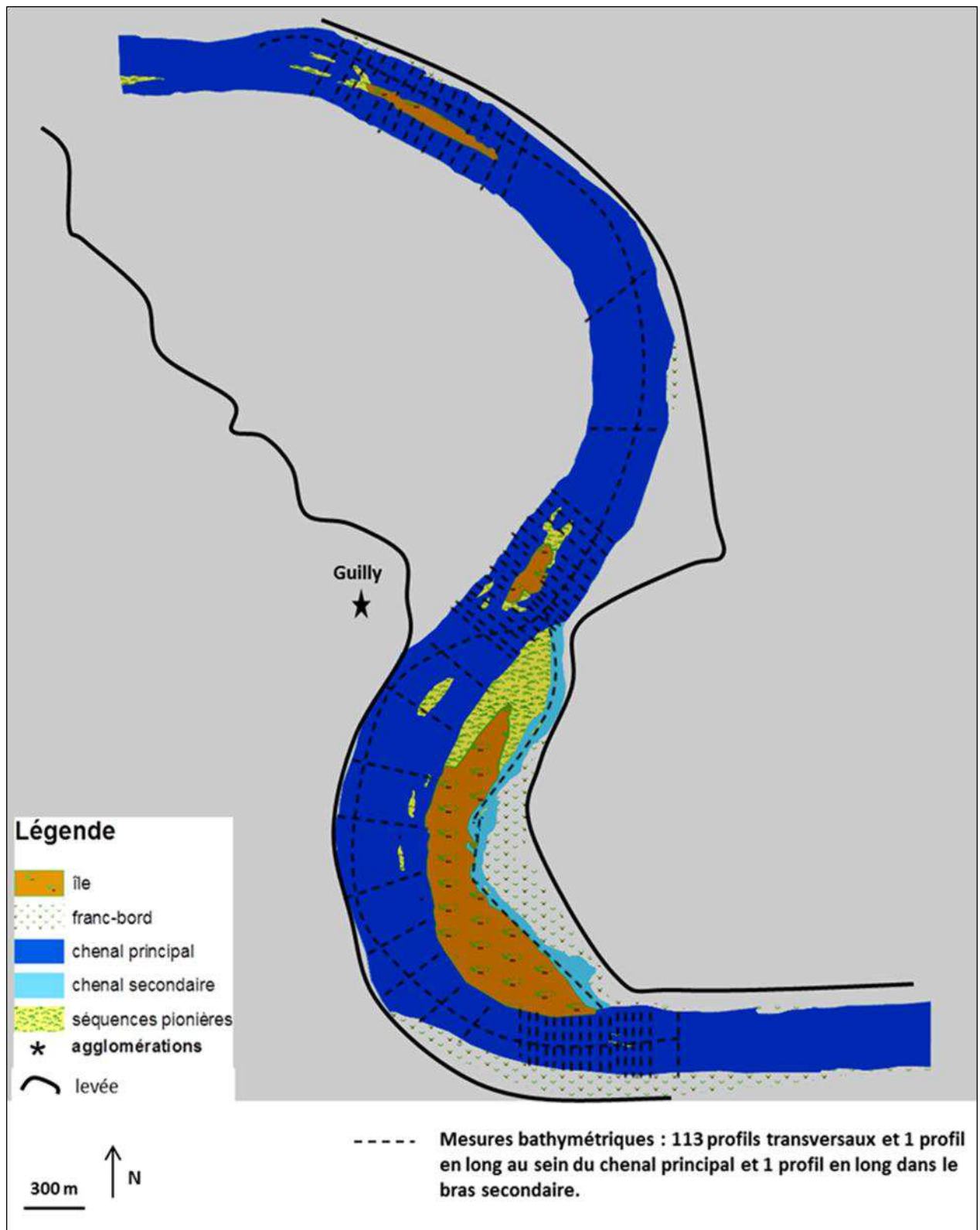


Figure 50. Protocoles de mesures bathymétriques (site ateliers de Guilly).

Tableau 8. Récapitulatif des protocoles de mesures topographiques et bathymétriques

Nom du site atelier	Mesures bathymétriques	Mesures topographiques
La Charité-sur-Loire	18 profils transversaux et un profil en long (chenal principal)	Maillage de point , 13 profils transversaux et un profil en long (chenal secondaire)
Mesves	8 profils transversaux et un profil en long (chenal principal)	Maillage de point , 5 profils transversaux et un profil en long (chenal secondaire)
Guilly	114 profils transversaux et un profil en long (chenal principal)	2 profils transversaux (chenal secondaire)

2.1.3 Analyse des données topographiques et bathymétriques, acquisition et exploitation de données

Nous accordons un intérêt particulier à l'analyse des données topographiques et bathymétriques. Cette approche fournit des informations précises et précieuses concernant les processus de la dynamique morpho-sédimentaire (érosion, sédimentation, transport solide). La fréquence de ces mesures est annuelle. Les campagnes de mesures topographiques ont été réalisées en période de basses eaux au sein des bras secondaires. Quant aux mesures bathymétriques, c'est la période des hautes eaux qui convient le plus pour mieux naviguer et disposer d'un tirant d'eau suffisant pour utiliser l'échosondeur. La répartition spatiale de certains profils au sein des sites ateliers a été définie en fonction des données déjà existantes, on a replacé nos profils aux mêmes endroits que les profils Crougneaux. Notre objectif est d'actualiser ces profils afin d'élargir le pas de temps de l'analyse de l'évolution topographiques : 8 ans pour les sites ateliers de **la Charité** et **Mesves**, 15 ans pour le site atelier de **Guilly**. Ce pas de temps d'analyse va nous permettre de corréler les résultats avec les événements hydrologiques (essentiellement les crues de 2003 et 2008).

Par ailleurs, nous avons utilisé ces données pour analyser la réponse géomorphologique de la bande active suite à l'arrêt de l'extraction de granulats dans le lit mineur (incision du plancher alluvial après 1995).

Les données nous ont été aimablement fournies par la DREAL Centre et le CETE de Blois. Il s'agit des campagnes de mesures suivantes :

- 1- mesures bathymétriques réalisées par le CETE de Blois en 2005 à la Charité et à Guilly en 2007 (semis de points et profil), ces données nous ont permis de cartographier le fond du chenal principal,
- 2- profils réalisés par le cabinet Crougeau, ces profils ont été réalisés en 1995. Ils concernent le site atelier de Guilly. On dénombre 6 profils au sein de ce site. Ces derniers ont fait l'objet d'une actualisation (1995 - 2010),
- 3- levé topographique haute résolution (**LIDAR**), l'acquisition de ces données a été réalisée au moyen d'un système de scannage aéroporté, la restitution des données est faite sous forme de semis de points XYZ avec une précision en Z 15 cm et 30 cm en XY. L'objectif de ces levées est d'obtenir un modèle altimétrique de haute résolution de la zone inondable de la Loire et partiellement de quelques affluents, soit environ une surface de 2000 Km². La densité de point est au minimum de 1 point pour 4 m². La DREAL Centre a mis à notre disposition les données sous forme de semis de points pour nos trois sites ateliers. Ces données sont associées aux données des profils de la ligne d'eau. L'objectif est d'effectuer une sectorisation des bras secondaires en fonction de leur durée de submersion à un tronçon plus étendu que nos sites ateliers (à l'échelle de la Reserve Naturelle du Val de Loire).
- 4- Les données topographiques issues du travail de thèse de **S. Grivel (2008)** concernant les sites ateliers de la Charité-sur-Loire et Mesves. L'exploitation de cette base de données nous a permis d'avoir un état de référence topographique des chenaux secondaires et de prolonger le pas de temps de l'analyse topographique de 6 ans (2002-2008)

Tableau 9. Reconstitution de la base de données.

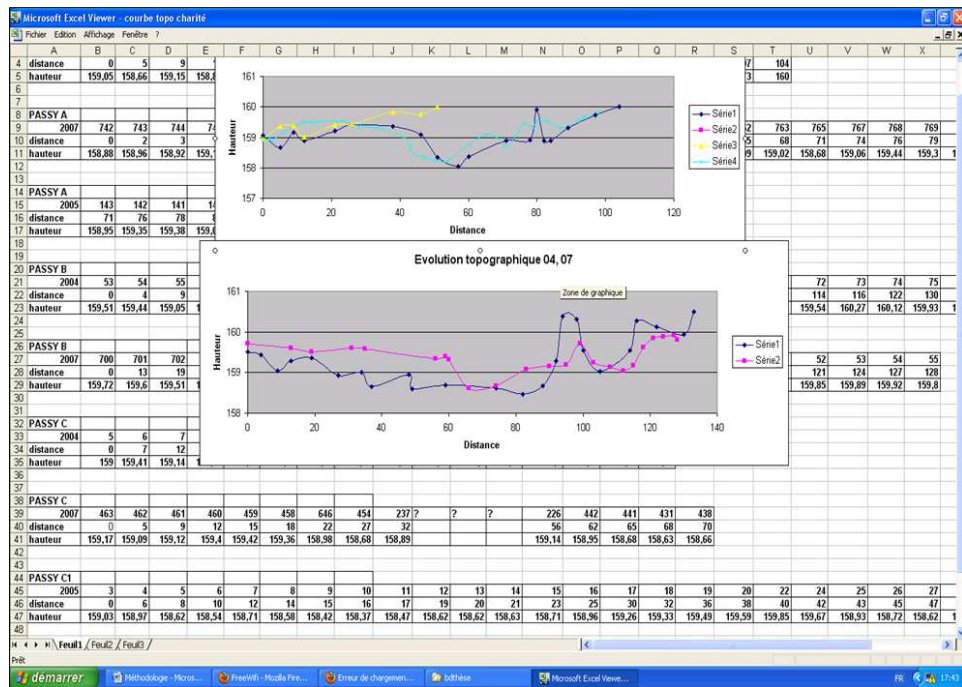
Source de données	Type de mesures	Année	Site	Précision des mesures (en altitude)
DREAL	topographiques	1995, 2002	La Charité-sur-Loire Guilly	LIDAR : 15 cm Crougneau : 0,5 à 1 m
CETE Blois	bathymétriques	2005, 2007	La Charité-sur-Loire Guilly	3 cm en Z
Thèse, S. Grivel	topographiques	2002, 2005	La Charité-sur-Loire Mesves	3 cm en Z

Les fichiers de données ont été récupérés en format « dbf », ce qui a rendu facile leurs insertion dans la base de données du SIG réalisée sous Arc-GIS.

2.1.3.1 Réalisation du bilan sédimentaire à partir des données topographiques et bathymétriques

a. Méthode de comparaison de profils topographiques

Nous avons appliqué une méthode diachronique spatialisée des profils transversaux et longitudinaux (Piegay et Landon., 1994 ; Gautier *et al.*, 2001 ; Grivel, 2008). Cette méthode permet d'étudier l'évolution verticale du chenal principal et des bras secondaires. Il s'agit d'effectuer une superposition de profils réalisés au même endroit à des dates différentes. Les points de mesures des profils transversaux suivent un linéaire perpendiculaire à d'écoulement. Ils sont réalisés le long d'un tronçon (au sein des sites ateliers). A partir de ces profils transversaux on peut reconstituer un profil en long en extrayant les valeurs des talwegs de chaque profil transversal. L'axe du profil en long est parallèle à l'écoulement (amont – aval). Les valeurs d'érosion ou de sédimentation sont déduites en comparant la différence de hauteur et en prenant en compte la date de réalisation des profils. Autrement dit, il s'agit d'une quantification du changement morphologique par superposition successive de profils transversaux (Maizels 1979 ; Ashowth et Ferguson, 1986). Cette méthode est simple et facilement applicable.



b. Création de Modèle Numérique de Terrain et calcul de volume

L'application des Model Numérique de Terrain en géomorphologie est de plus en plus fréquente (Martin and Church, 1995 ; Brasington *et al.*, 2000 ; Hooke and Mant, 2000 ; Eaton and Lapointe, 2001; Fuller *et al.*, 2003 ; Fuller et al., 2003 ; Rumsby *et al.*, 2008 ; Legleiter and Kyriakidis, 2008 ; Heritage *et al.*, 2009) cette technique permet d'identifier les changements morphologiques et fournit des indicateurs spatio-temporels des phénomènes d'érosion et de sédimentation. Nous avons réalisé au niveau des zones de connexions des bras secondaire avec la Loire des semis de points d'une densité de 5 points de mesures par m². L'objectif est d'effectuer une représentation de la topographie du terrain au moyen d'un codage numérique. Cela permet de cartographier avec précision les zones affectées par l'érosion et les secteurs de sédimentation et calculer leurs volumes.

De nombreux auteurs montrent que la qualité du M.N.T est étroitement liée à la densité des mesures, les caractéristiques physiques du terrain (la taille, la pente...) et la précision des techniques d'interpolation (Bratney *et al.*, 2003 ; Chaplot *et al.*, 2005). Desmet, (1997), définit la précision du MNT comme un compromis entre « précision » et « fidélité de la forme », la précision est évaluée par des indices comme : l'erreur moyenne ou RMSE. Quant à la fidélité de la forme, elle est évaluée par une analyse statistique d'un jeu de paramètre caractérisant les propriétés spatiales (pente, courbure, rugosité...), cet auteur met aussi en évidence le degré de précision, la performance de l'outil de mesure (ex : GPS, DGPS, échosondeur..) et la fiabilité de la technique d'interpolation (ex : Krigeage, SDI, TVD...) (Wood, 1996 ; Wechsler, 2000). D'autres auteurs comme (Borga et Vizzaccaro, 1977) notent que l'augmentation de la densité de points de mesures réduit l'impact des techniques d'interpolation (la marge d'erreur).

Notre stratégie d'acquisition de données sur le terrain prend en compte les éléments suivants :

la précision de l'outil de mesures (DGPS précision centimétrique)

la topographie (banc, seuil, mouille)

les ruptures de pente

la répartition spatiale des points de mesures (une couverture de toute la surface)

la quantité et la densité des points de mesures pour représenter la surface

Les données sont traitées sous Excel et intégrées dans la base de données réalisée sous Arc-Gis 9.1. La méthode d'interpolation utilisée pour la réalisation de M.N.T est le krigeage Ordinaire. Cet algorithme d'interpolation est couramment utilisé en géomorphologie fluviale (Booker *et al.*, 2001 ; Fuller *et al.*, 2003 ; Nicolas, 2003 ; Fergusson *et al.*, 2003). Le krigeage ordinaire est une méthode géostatistique qui prend en compte la distance et le degré de variation entre les points mesurés. Elle repose sur la structure de corrélation spatiale des données pour déterminer la valeur de la pondération. L'estimation des valeurs « inconnus » est basée sur les valeurs des points connus et leurs emplacements. Testé sur de nombreux sites et à des échelles spatiales différentes, le krigeage aboutit à un bon résultat.

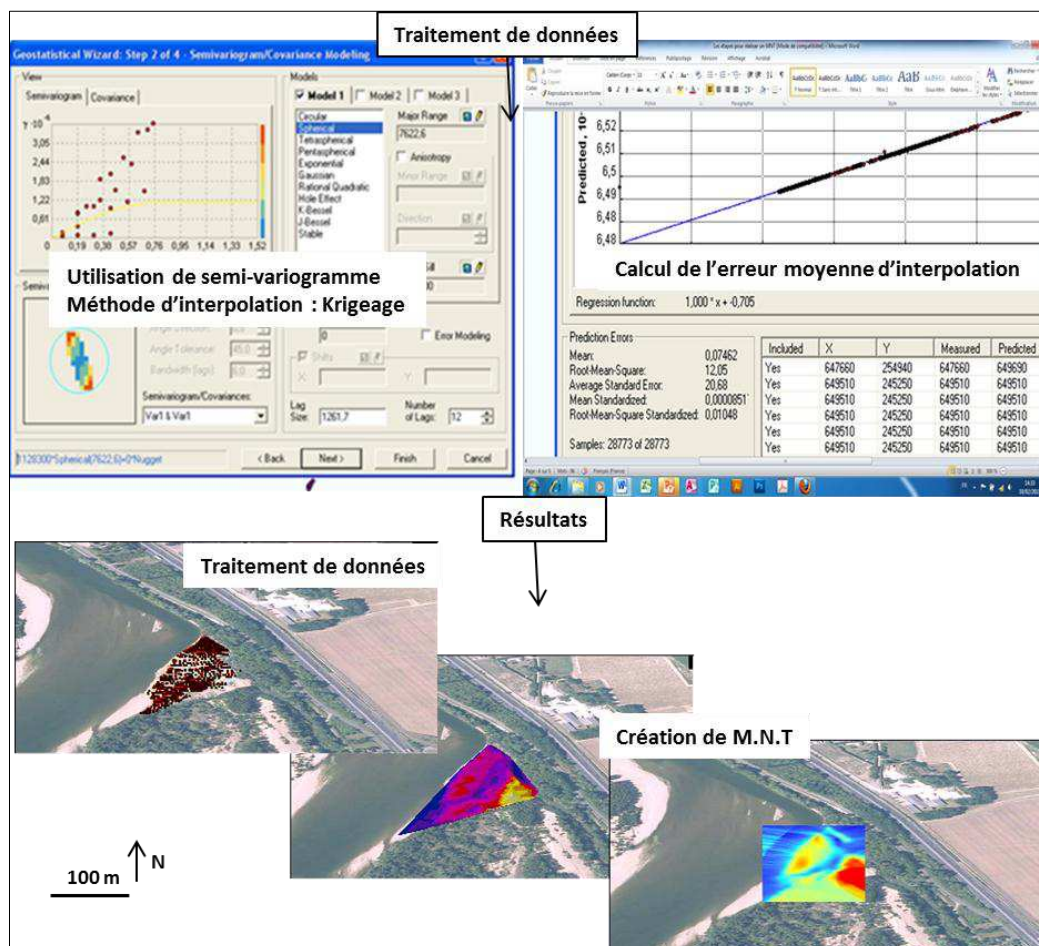


Figure 53. Exemple de création de MNT (site atelier de Mesves).

Le MNT permet d'effectuer une cartographie précise des zones d'érosion et de sédimentation ainsi que le calcul de leurs volumes.

Nous avons réalisé 3 séries de Modèles Numériques de Terrain sur chaque site, ces derniers correspondent aux campagnes de mesures de 2008, 2009 et 2010. Les M.N.T ont été réalisés sous le logiciel Arc-Gis 9.1. Le krigeage nous a permis de calculer l'erreur moyenne d'interpolation. Cette dernière varie entre de 1,5 à 3 cm (la marge d'erreur du DGPS est incluse), alors que la variation topographique dans ces secteurs varie de 1 à 2 m en moyenne. Ce résultat met en évidence la fiabilité des résultats de la méthode d'interpolation. Une fois le M.N.T réalisé, nous avons effectué de nombreuses sorties sur le terrain pour valider le modèle. L'objectif est de réaliser une carte des unités morphologiques (limites des : seuil mouille et banc) au moyen du DGPS et de la comparer avec la carte issue de la modélisation. Cette approche représente un moyen supplémentaire pour vérifier les résultats des M.N.T. ces sorties sur le terrain nous ont permis de valider les résultats obtenus par la méthode d'interpolation.

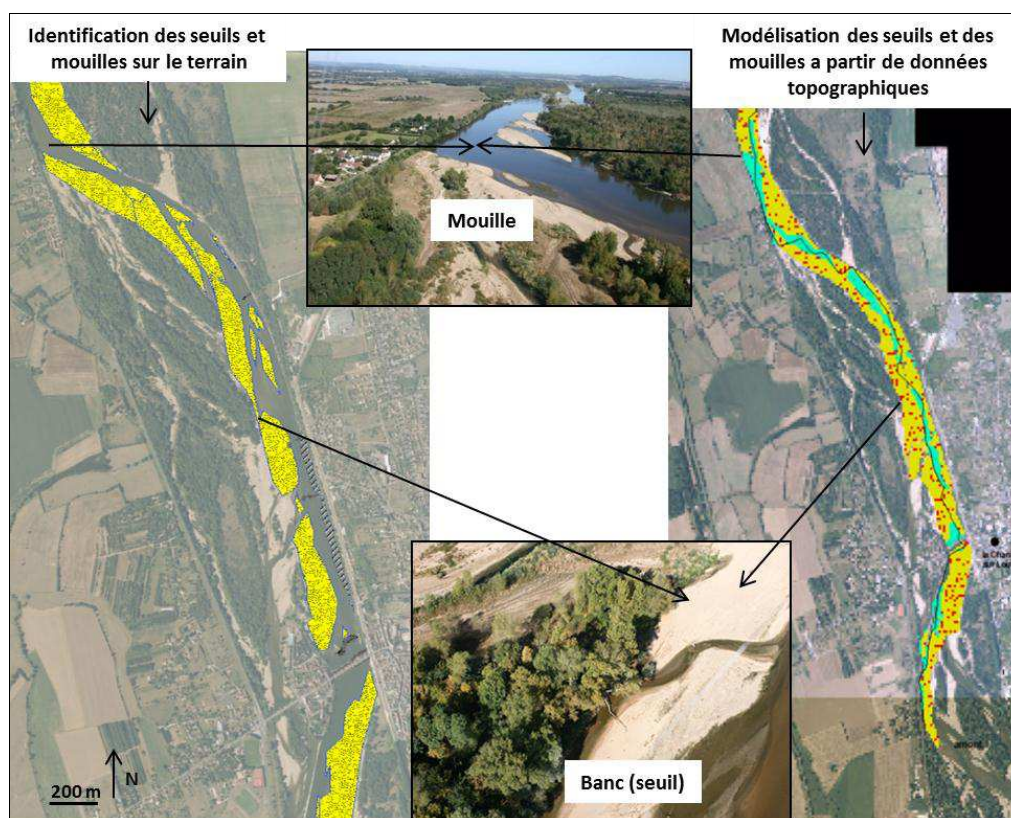


Figure 54. Validation du modèle par l'identification des unités fluviales sur le terrain

c. Le calcul de la marge d'erreur lors de la comparaison de deux M.N.T

La soustraction de deux MNT successifs nous a permis d'établir un bilan sédimentaire (interannuel) en calculant les volumes de sédiment érodés et accumulés. Une cartographie

précise des secteurs d'érosion et de sédimentation a été réalisée. Le croisement de l'information issue de cette carte avec ceux de la carte du couvert végétal permet de mettre en évidence l'impact de la végétation sur la topographie. Le même principe de superposition est appliqué avec la carte des différents aménagements et ouvrages de navigation (pont, chevette, seuil dur, digue), l'objectif est d'analyser l'impact de ces aménagements sur la dynamique morpho-sédimentaire.

L'incertitude de l'interpolation est mesurée selon la méthode proposée par **Wheaton et al., (2009)**, ces auteurs présentent de nouvelles méthodes d'estimation de budget sédimentaire en utilisant des méthodes statistiques robustes. L'application de ces nouvelles techniques repose sur des données de haute résolution recueillis à partir d'un sondage sur le terrain, ces mesures ont été réalisées sur un tronçon d'un kilomètre au sein d'un cours d'eau anastomosé (la rivière Feshie en Ecosse). Le pas de temps de mesure est de 5 années. Nous avons appliqué la même méthode pour calculer la marge d'erreur. Il s'agit de calculer la valeur de la racine carré de l'écart à la moyenne de la somme de deux modèles successifs (modèle années n + modèle de l'année $n+1$).

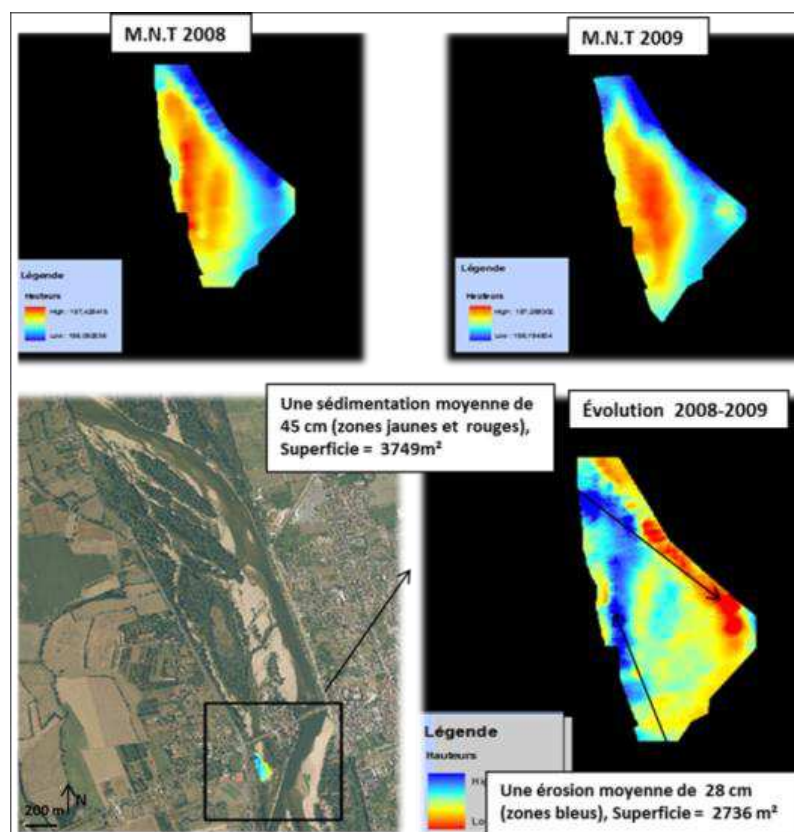


Figure 55. Bilan sédimentaire réalisé dans le site atelier de la Charité-sur-Loire.

2.1.4 Etudes de l'évolution spatiale du couvert végétal et son impact sur la topographie

Application d'une nouvelle technique (site de La Charité-sur-Loire).

La cartographie de l'évolution spatiale du couvert végétal a été réalisée au moyen du DGPS, des cartes, des photographies aériennes et des photos à haute résolution spatiale prises au moyen d'un ballon captif (au niveau de la connexion aval du bras secondaire de La Charité-sur-Loire). Ces sources de données ont permis d'effectuer deux type d'analyse :

- l'analyse réalisée au moyen des cartes et des photographie aérienne concerne les trois site ateliers (La Charité-sur-Loire, Mesves et Guilly). L'objectif est d'effectuer une typologie simplifiée de l'évolution spatial du couvert végétal en séparant la végétation arborée de la végétation en cours de développement (séquences pionnières). Cela afin de déterminer le degré de stabilité des formes végétalisées au sein du lit mineur.

- l'analyse réalisée à partir des donnée issus des photos réalisées par le ballon captif et des M.N.T a pour objectif de déterminer l'influence de la végétation sur l'évolution topographique au sein de ce site. on raison du coup de cette opération et de la difficulté d'aplication de la technique de prise de vue (la prise de vue au moyen du ballon captif nécessite des conditions météorologique particulière), nous avons limité le champs spatial de son application à un seule site. Les photos ont été prise en 2009 et 2011. Le nombre de photos réalisée annuellement est d'environ 500.

2.1.4.1 La technique de prise de vue au moyen d'un ballon captif

cette technique a été mise en œuvre en 2009 pour étudier l'occupation des sols au sein du site atelier de la Charité sur Loire. Les prises de vue ont été menées grâce à la collaboration de M. Chagny, spécialiste de cette technique (**Chagny, 1994, 1996 ; Chagny et Hannois 2002 ; Chagny et Fournier, 2007 ; Chagny et Hesse 2007**).

Le ballon est doté d'une nacelle photographique. Un GPS embarqué permet une géolocalisation de la nacelle au moment de la prise de vue. Un certain nombre de données sont automatiquement mémorisés pour chaque photo : altitude, cap, force du vent, heure. Comparée à la technique de photographie sous cerf-volant l'utilisation du ballon captif est plus délicate (fragilité, déplacements sur le terrain, transport), moins polyvalente et surtout plus onéreuse. Cette technique a été utilisée par **Chagny (2006)** pour des études

d'archéologie en Egypte et en Iran. Son utilisation en géomorphologie fluviale est nouvelle.

La prise de vue

Le positionnement au niveau de la zone de travail (avec déplacements éventuels) puis la mise en altitude du ballon sont réalisés en fonction du type de photographies souhaité. Un vent supérieur à 1m/s rend l'utilisation d'un ballon sphérique en latex délicate (stabilité latérale et mise en altitude très perturbées) voire impossible (le ballon se couche sous la poussée du vent). Avec un ballon latex, c'est à pieds que les déplacements sont réalisables sans prendre trop de risques. Le volume à déplacer oblige à une marche lente loin des obstacles naturels (clôtures, arbres, épineux) et des remous causés par les gros véhicules.

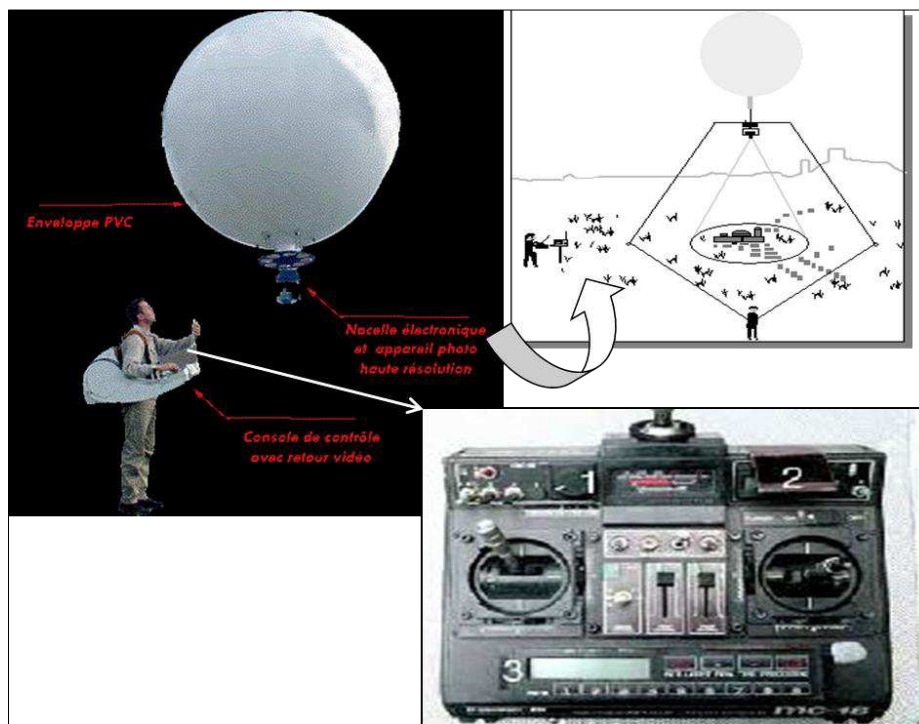


Figure 56. Principe du fonctionnement de la technique du ballon captif.

Prise de vue à haute résolution spatiale. La radiocommande : 9 voies numériques programmables (MC 18 Graupner en mode PCM) avec sécurisation de la prise de vue (en cas de perte de portée) par fail-safe à 0,1 seconde. Comptage des photos (compteur dédié) et du temps vidéo (chronomètre intégré). Autonomie de 5 heures. Antenne courte souple (sécurité). Voies de commandes : 1 : commande du zoom 2 : compteur de vues (avec pare-soleil) 3 : écran de fonctions (chrono etc.).

(Source : <http://www.acomimage.com/technologie/ballon-captif-radiocommande>).

Application et exploitation des données

Les prises de vue aérienne réalisées sous ballon captif sont intégrées dans un système d'information géographique. On procède dans un premier temps à la sélection et à l'assemblage des photographies pour avoir une vue globale du site d'étude. Ce travail été réalisé sous le logiciel Photoshop. Le géoréférencement et le redressement de l'image globale ont été réalisés à partir du logiciel ArcMap *version 9.1*.

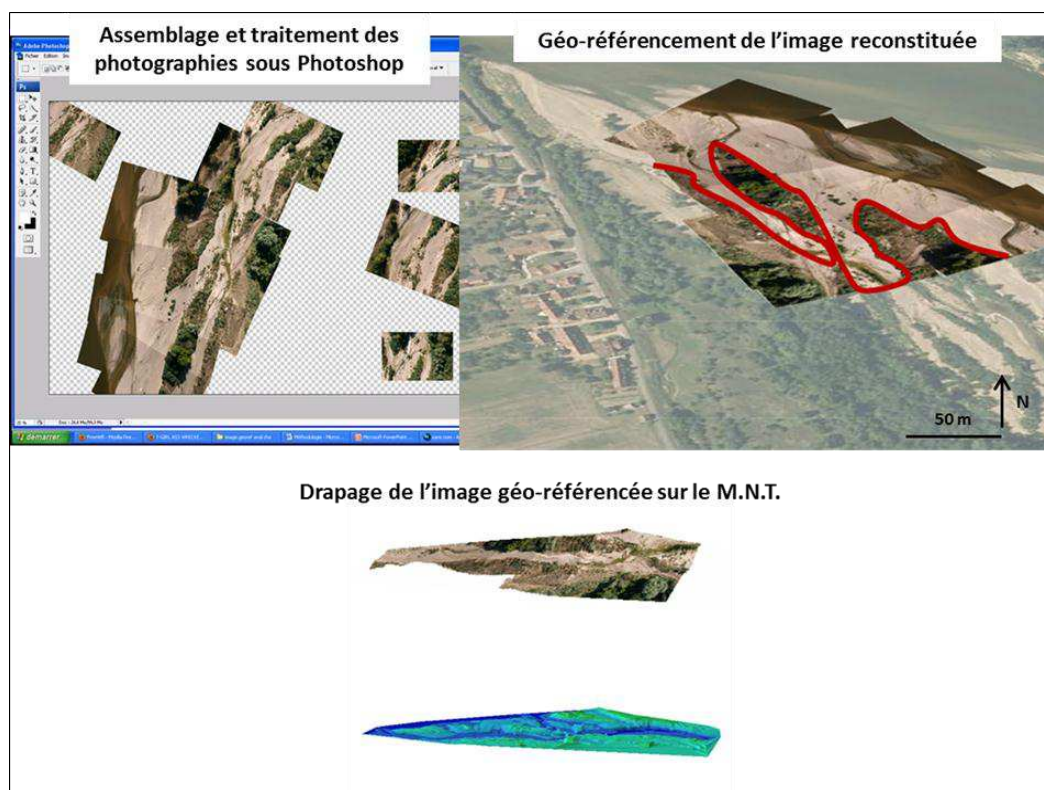


Figure 57. Drapage des photographies à haute résolution spatiale sur le M.N.T, site-test : rive gauche de La Charité-sur-Loire.

Nous avons commencé par une délimitation des périmètres végétalisés, puis une identification du type de végétation et enfin une mesure de la hauteur moyen de la végétation. La superposition de la carte de l'évolution spatiale de la végétation avec celle de l'évolution topographique permet d'appréhender l'effet de la végétion sur la topographie au sein des secteurs étudiés.

L'exploitation de ce document permet d'avoir des informations précieuses. Ces dernieres peuvent être intégrer dans l'analyse géomorphologique. On s'intéresse dans le cadre de notre travail de recherche à l'évolution spatiale du couvert végétale au niveau des connexion des bras secondaires et du chenal principal. Pour des raisons de coût et de

faisabilité des ces compagne de prise de vue aériennes, nous avons sélectionné seulement le site atelier de la Charité sur Loire.

La photographie aérienne à haute résolution spatiale permet d'effectuer un suivi très fin de l'évolution du couvert végétal (typologie, extension spatiale, présence d'espèces invasives, stades végétatif...). Par ailleurs, le croisement des informations issus des photographies aériennes avec ceux du modèle d'évolution topographiques (M.N.T) renseigne sur :

l'influence de la végétation sur l'évolution topographique

le type de végétation qui piège le plus de sédiments

- ces informations sont prises en compte pour cibler et améliorer les travaux de restauration réalisés dans ce secteur (dévégétalisation & scarification).

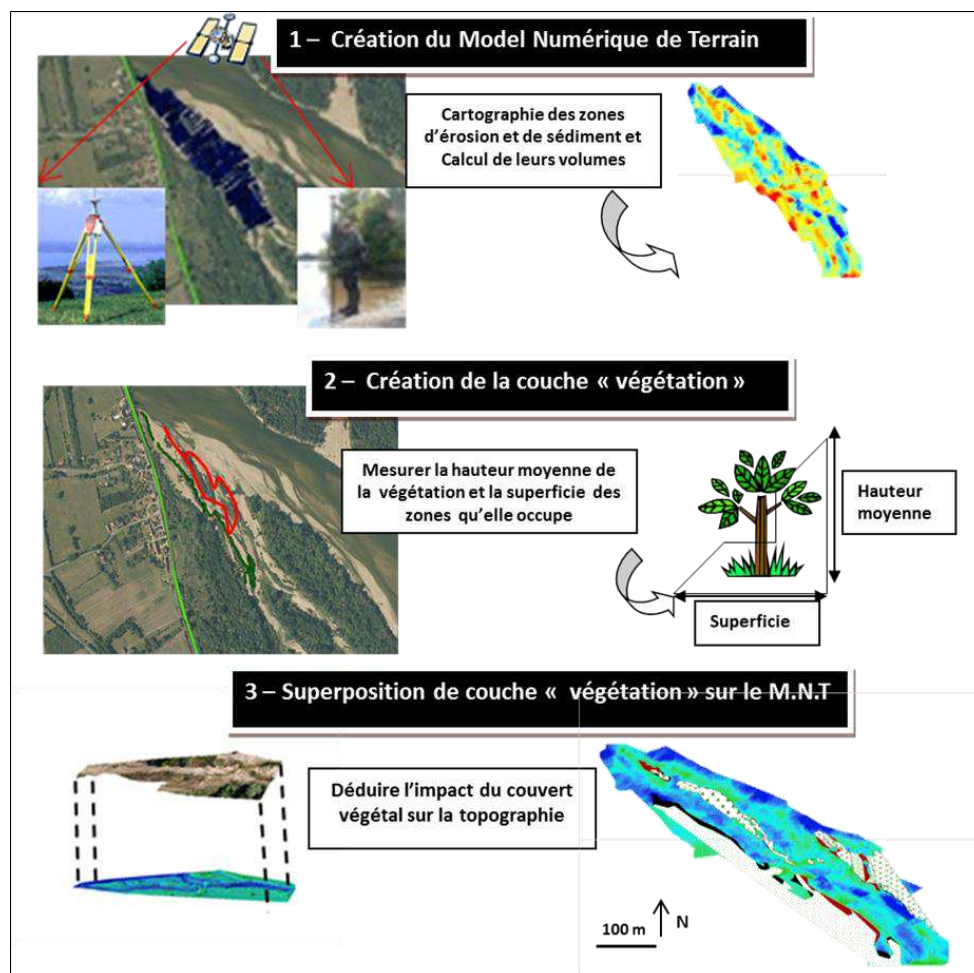


Figure 58. Exemple d'analyse de l'impact de la végétation sur la topographie (site de la Charité-sur-Loire).

2.2 Le Transport solide, protocole de mesure et d'analyse de la charge solide

Mise en évidence du rôle morphogène de la répartition spatio-temporelle de la charge solide

Au sein des cours d'eau, le transport solide s'effectue en fonction de la vitesse des courants, de la pente et de la géométrie du lit (répartition des énergies). Le déplacement des grains est dû à la *force de traînée* et *de portance* (figure 59). Selon ces conditions la rivière adopte son profil d'équilibre. Les grains sont susceptibles d'être déplacés lorsque la turbulence de l'eau devient forte. Le transport solide est un phénomène à seuils avec trois modes de transport : charriage, saltation et suspension, ces derniers ont une influence différente sur la morphologie du cours d'eau. Le charriage a un rôle morphogène sur le fond du lit et les matériaux en suspension ou saltation peuvent avoir un effet sur la morphologie des îles, bancs et bras secondaires (figure 60). Le transport solide influence l'évolution géomorphologique des rivières. Ce même transport de la charge solide est influencé à son tour par le contexte géomorphologique dans lequel évolue l'hydrosystème. De nombreuses études (Shumm, 1977 ; Bravard et Petit, 1997 ; Galéa et al., 2004) mettent en évidence l'influence : du bassin versant (taille, occupation du sol), la présence d'ouvrages (barrage, digue, pont...), les conditions climatiques. Cette interaction de phénomènes d'origines naturelles et anthropiques rend l'étude du transport solide complexe. L'érosion se produit au sein des bassins versants sous l'effet du vent, pluie, fonte de neige et l'alternance gel-dégel. La charge solide issue de cette érosion parvient partiellement au réseau hydrographique. L'érosion qui se produit au niveau des berges et du fond du lit s'effectue de façon permanente et influence la topographie du chenal. Les matériaux granulaires transportés par le cours d'eau sont en provenance du bassin versant, du fond du lit et des berges. L'apport en sédiments permet à la rivière de maintenir un certain équilibre entre transport et dépôts de la charge solide et cela en fonction de la variation des débits liquides. L'évolution topographique des unités fluviales (îles, bancs, berge et chenaux) est le résultat du rapport débit solide, débit liquide (variables de contrôles).

On distingue trois modes de transports des matériaux granulaires en fonction de la compétence du cours d'eau :

- la suspension : les matériaux solides sont emportés par le courant sans toucher le fond, les particules se déplacent à la vitesse de l'eau au voisinage du grain (concerne généralement les particules limoneuses et argileuses)
- le charriage : les particules se déplacent sur le fond du lit en roulant (sables grossiers, gravier et galet)
- la saltation : désigne le mouvement par bonds successifs des particules emportées par le courant (rebond du grain sur le lit). Ces particules ne peuvent dépasser 20 fois leur diamètre en hauteur et 200 fois en longueur (**Bagndd, 1977**).

Selon **Bravard et Petit (1997)**, le triptyque transport en suspension-saltation-roulage représente un continuum à des stades d'intensité du flux différents. En fonction des conditions dynamiques, on passe de la suspension au charriage via le stade intermédiaire de la saltation. Les modes de transport sont influencés par les caractéristiques physiques des particules (taille, forme et poids) et celles du cours d'eau (débit, pente et géométrie du lit). Ces éléments physiques ont été mis en évidence par le précurseur italien **Domenico Guglielmini, (1656-1710)**, dans un document publié en 1697. L'auteur parle de l'influence directe de la pente sur la puissance brute et la force tractrice. La régénération des formes fluviale est le résultat de la remobilisation de la charge solide. Ce processus de changement de géométrie des unités fluviales est aussi contrôlé par les événements hydrologiques. La concentration de matériaux en suspension augmente avec le débit. Le stock sédimentaire est susceptible d'être mobilisé lors d'un événement hydrologique important.

Selon leur intensité les pluies peuvent avoir un effet de lessivage des versants et par conséquent produire des sédiments susceptibles d'être injectés dans le cours d'eau, augmentant ainsi la concentration de M.E.S. Le rapport concentration débit peut varier en fonction des saisons, les premières crues enregistrées après une période de sécheresse peuvent engendrer des concentrations plus importantes (**Bravard et Petit, 1997**). Cela est dû à l'état du bassin versant.

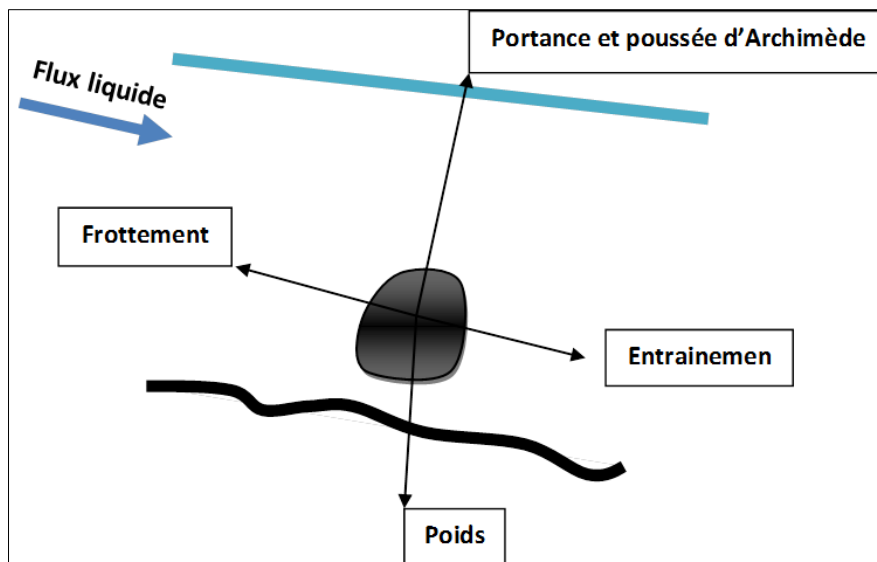


Figure 59. Les différentes forces exercées sur un grain en équilibre

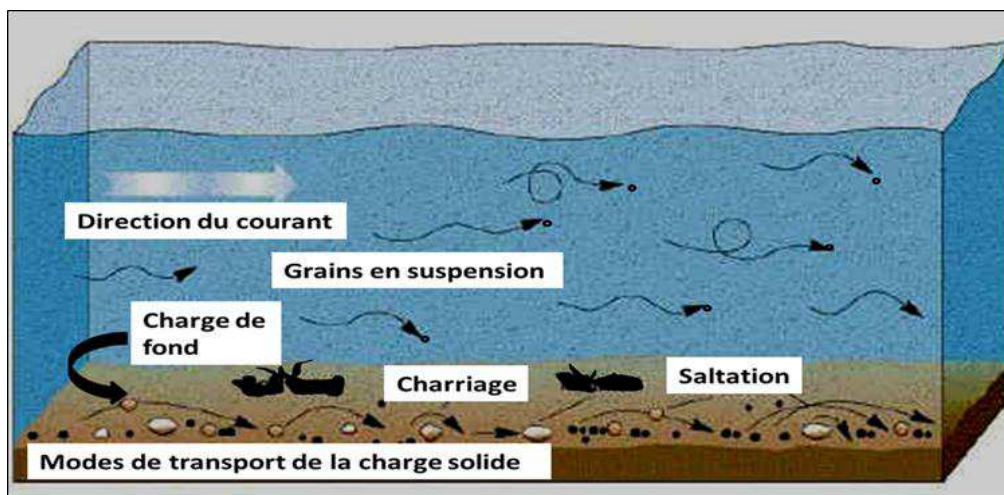


Figure 60. Les trois modes de transport de la charge solide

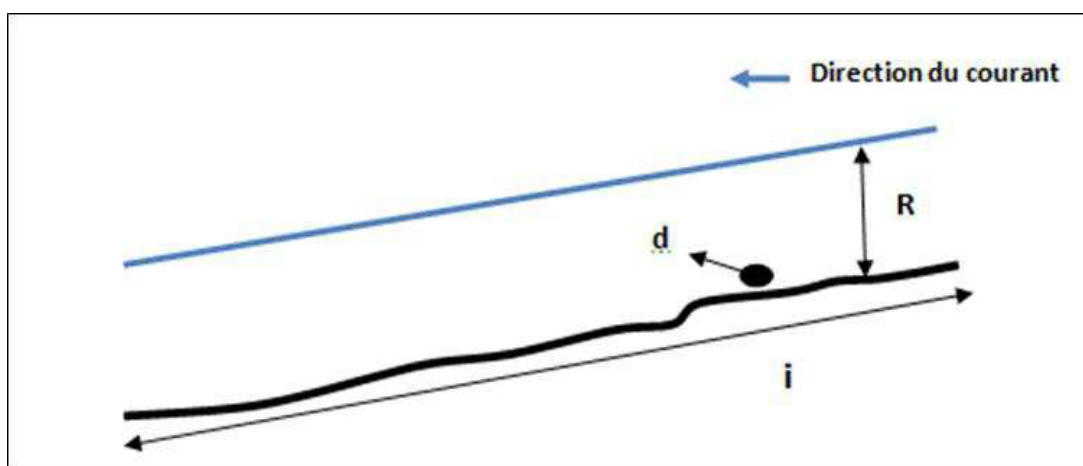


Figure 61. Les paramètres physiques contrôlant le mouvement de sédiment au sein du chenal.

L'intérêt de l'étude du transport solide

L'étude du transport de sédiments est importante pour la mise en œuvre de projet d'aménagement hydraulique (Pont, barrage, digue...) et de restauration des cours d'eau (travaux de dévégétalisation et de réouverture de chenaux secondaires). La prévision de l'évolution topographique du lit de la rivière permet d'établir une stratégie de protection des riverains, ouvrages et des terres : protection contre risque d'inondation, déstabilisation des ponts par affouillement, alluvionnement des retenues, dégradation des terres agricoles...etc.

Le cas de la Loire moyenne : Les gestionnaires de la Loire se sont retrouvés confrontés à un milieu complexe et en permanente évolution. Cela rend difficile l'adaptation d'un modèle standard de restauration (les modalités d'évolution hydro-morphologique diffèrent d'un site à un autre).

Notre approche consiste à mettre en relation les paramètres dynamiques suivants : le contexte géomorphologique et hydrologique, les caractéristiques granulométriques de la charge solide, les caractéristiques géométriques et physiques du lit et l'influence anthropique (présence d'aménagements). L'objectif est d'analyser la capacité de remobilisation des sédiments au sein de la bande active et l'influence du forçage anthropique et des conditions hydrologiques sur l'évolution spatio-temporelle du stock sédimentaire.

L'objectif est de fournir des informations permettant de définir des scénarios d'aménagement pour assurer la mise en eau des bras secondaires et apporter des éléments d'orientation pour cibler les interventions de restauration. Le rôle protecteur de la végétation n'est pas pris en compte, l'analyse concerne les sites faisant l'objet de travaux de dévégétalisation.

On s'intéresse dans le cadre de ce travail de recherche aux processus régissant le transport solide au sein du bras secondaires situés dans le site atelier de La Charité-sur-Loire. Comme décrit dans le chapitre 1, ce chenal secondaire a fait l'objet de travaux de restauration (dévégétalisation, scarification et remobilisation de sédiments). Les gestionnaires du fleuve (DDT et DREAL Centre) visent à travers ces interventions

(généralisées à l'échelle de la Loire moyenne) à maintenir les bras secondaires ouverts, favoriser le transfert de sédiments vers le chenal principal et préserver le patrimoine faunistique et floristique. Pour répondre à ces objectifs nous avons mis en œuvre un protocole d'analyse qui consiste à déterminer le débit critique d'entraînement des grains (l'écoulement exerce sur le sédiment une force susceptible de les mettre en mouvement). Cela dépend du poids des grains et du rapport entre la force du frottement et la force d'entraînement due à l'écoulement. Le début de mouvement d'un grain de diamètre d est calculé à partir du paramètre adimensionnel de **Shields**. Le critère de début de mouvement pris en compte est celui défini par **Parker (1982)**. Le paramètre de Shields est calculé en utilisant le diamètre médian des sédiments.

Par ailleurs **Petit** (date), montre que la force tractrice calculée à partir de la pente d'énergie et du rayon hydraulique est un critère fiable pour expliquer les processus d'érosion et de transport solide. Ce même auteur met en évidence l'influence des variations des forces tractrice sur la morphologie du lit.

Pour compléter notre analyse, nous avons déterminé en plus des caractéristiques granulométriques du stock sédimentaire les débits de submersion du bras et les hauteurs de la ligne d'eau à partir des stations de mesures hydrométriques et aussi des mesures *in situ* réalisé au moyen du DGPS. Les résultats issus de l'analyse topographique ont été exploités pour définir les paramètres physiques de la bande active (pente, la largeur du chenal, la localisation du stock sédimentaire). Le croisement de ces approche a permis de :

- déterminer la contrainte tractrice critique

- caractériser le stock sédimentaire en fonction de la classe granulométrique

- déterminer le débit critique d'entraînement des grains

- pour $\tau^* < 0,027$	le grain de diamètre d est au repos ; le fond est plat ;
- pour $0,027 < \tau^* < 0,047$	il y a apparition des tous premiers mouvements, mais pas assez pour générer un débit solide ;
- pour $0,047 < \tau^* < 0,062$	le grain est charrié sur fond plat ;
- pour $0,062 < \tau^* < 0,25$	le grain est charrié par dunes ;
- pour $0,25 < \tau^* < 2,5$	le grain est transporté par dunes en suspension ;
- pour $\tau^* > 2,5$ environ	le grain est transporté en suspension sur fond plat.

Avec : R = rayon hydraulique ;
 i = pente de l'écoulement ;
 γ_s = poids volumique spécifique des grains solides $\gamma_s \approx 26 \text{ à } 27 \text{ kN/m}^3$;
 γ_w = poids volumique de l'eau ($\gamma_w \approx 10 \text{ kN/m}^3$) ;
 d = diamètre du grain.

Figure 62. Mise en mouvement des sédiments en fonction de la valeur du paramètre de Shields, classification proposée par Ramette.

Pour apporter des informations complémentaires à cette analyse nous avons effectué un suivi de l'évolution spatial des galets dans tout le bras secondaire.

Un autre type de mesure est réalisé dans le chenal principal pour d'autres objectifs (mesure de M.E.S). Les détails de toutes ces mesures sont présentés ci-dessous :

- prélèvement sédimentaire effectué au sommet des bancs dans les chenaux secondaire pour calculer la contrainte tractrice critique,
- mesure des galets au sommet des bancs au sein des chenaux secondaires pour évaluer la capacité de transport,
- prélèvements de la charge solide en suspensions sur une section transversale au sein du chenal principal pour estimer l'évolution des volumes de M.E.S en fonction des débits.

Tableau 10. Récapitulatif des objectifs de l'étude du transport solide

Techniques	Unité fluviale	Objectifs
Filtration des prélèvements de MES 	Chenal principal (section transversale)	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse de la variation verticale et transversale la concentration de Mes en fonction des débits. - Estimation de l'évolution du débit solide en fonction du débit liquide. (calcul de volume)
Tamissage des prélèvements sédimentaires  Mesure de Galets peintes 	Chenal principal (seuils) et chenal secondaire (sommets des bancs)	<ul style="list-style-type: none"> - Déterminer la force tractrice critique. - Déterminer la puissance spécifique. - Prédiction de la mise en mouvement des particules (débit critique). - Calcul de volume sédimentaire (érodé ou accumulé) - Analyse des modifications morphologiques

2.2.1 Description du protocole de mesures et d'analyse des prélèvements de la charge solide à l'échelle fine

2.2.1.1 Les prélèvements sédimentaires

Les sables fins et grossiers :

La taille des particules permet de définir le mode de transport (suspension, saltation et roulement). En fonction de leur poids les sédiments iront plus ou moins vite au fond du chenal. Le cours d'eau abandonne la charge solide par défaut de compétence. Cela se traduit par la formation de zones de dépôts. Ces accumulations de sédiments peuvent être fixées par un couvert végétal et donner naissance à de petits îlots séparés par des chenaux secondaires, tandis que la fermeture de ces bras par comblement favorise le raccordement des îlots et la formation des îles. L'analyse granulométrique renseigne sur le mode de

dépôt final et apporte des éléments d'explication relatifs aux différents agents de transport. Cette technique peut s'appliquer à toutes les dimensions depuis les blocs jusqu'à celle des argiles.

Les prélèvements ont été effectués au sommet de chaque banc situé sur la trajectoire des profils transversaux au sein du site atelier de La Charité-sur-Loire et de Mesves. Le choix des points de prélèvement est en fonction de la topographie et de l'homogénéité des dépôts sédimentaires (détection visuelle sur le terrain). Notre intérêt porte sur les dépôts sédimentaires superficiels (au sommet des bancs, 0 à 10 cm environ), ces derniers sont susceptible d'être mobiliser en premier. Les données issues de ces mesures sont utilisées pour calculer la contrainte de cisaillement.



Photo 5. Prélèvement d'un échantillon (site atelier de La Charité-sur-Loire).

Le prélèvement de cet échantillon s'est effectué sur un banc localisé dans la partie amont du site atelier de la Charité. Nous avons choisi le sommet du banc pour prélever les dépôts récents. On procède par l'élimination d'une couche superficielle très légère : la couche de vannage. Les sédiments issus de cette dernière sont souvent mobilisés par le vent, ce qui rend leur analyse peu fiable, on s'intéressera plus à la couche qui se trouve en dessous de la couche de vannage.

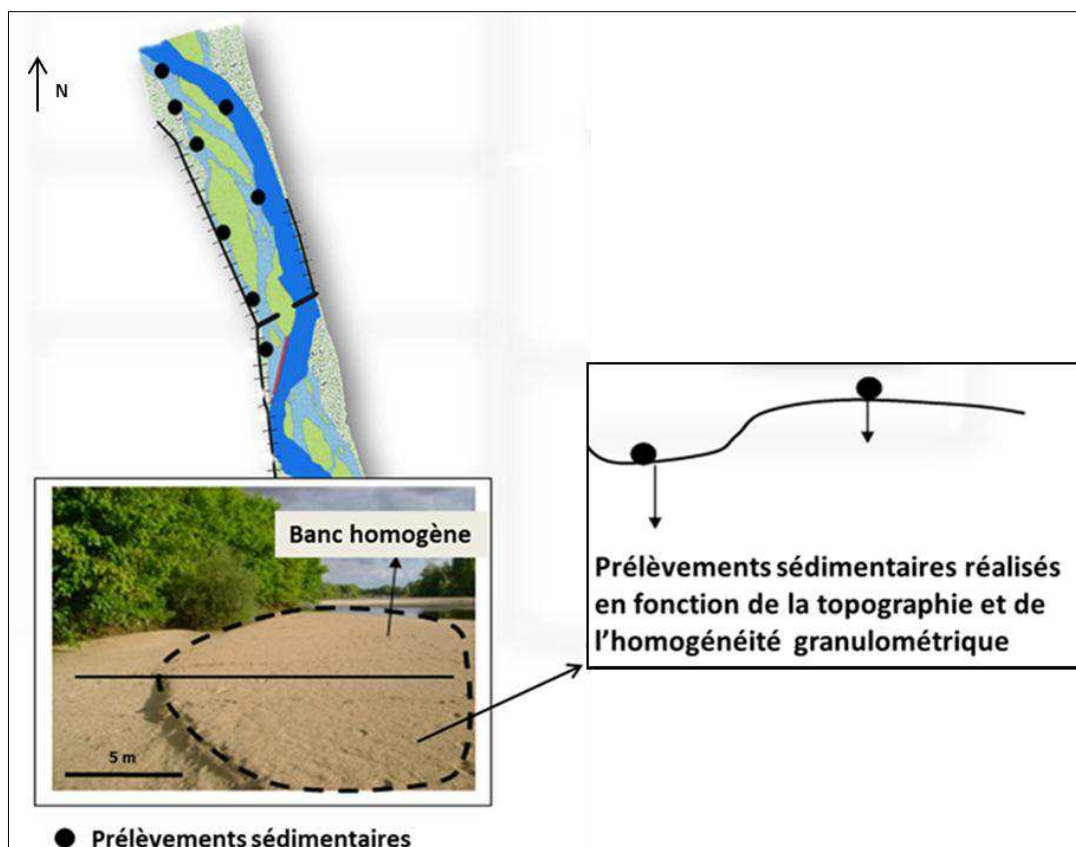


Figure 63. Localisation des prélèvements sédimentaires (site de La Charité-sur-Loire).

L'analyse des prélèvements sédimentaires

Les échantillons ont été analysés au laboratoire de sédimentologie du CNRS de Meudon. L'analyse granulométrique diffère en fonction de la taille des sédiments, on utilise les tamis pour les échantillons dont les particules sont d'un diamètre supérieur à 1.6 mm et le tamisage électronique pour ceux de diamètre inférieur. L'analyse granulométrique permet d'effectuer une classification des particules en fonction de leur diamètre. La séparation des différentes classes de gains est effectuée au moyen de tamis. Nous avons utilisé pour notre analyse des tamis de modules : 1,6 ; 2, 2,5 ; 3,15 ; 4 ; 5 ; 6,3 ; 8 ; 10 ; 12,5 ; 16 et 20 mm. Les galets refusés par le tamis de 20 mm, ont fait l'objet d'une mesure des axes (a), (b) et (c). Les sédiments dont le diamètre est inférieur à 1,6 mm, ont été analysés au moyen d'un tamisage électronique. La courbe granulométrique réalisée pour chaque échantillon regroupe des données issues de ces trois méthodes d'analyses.

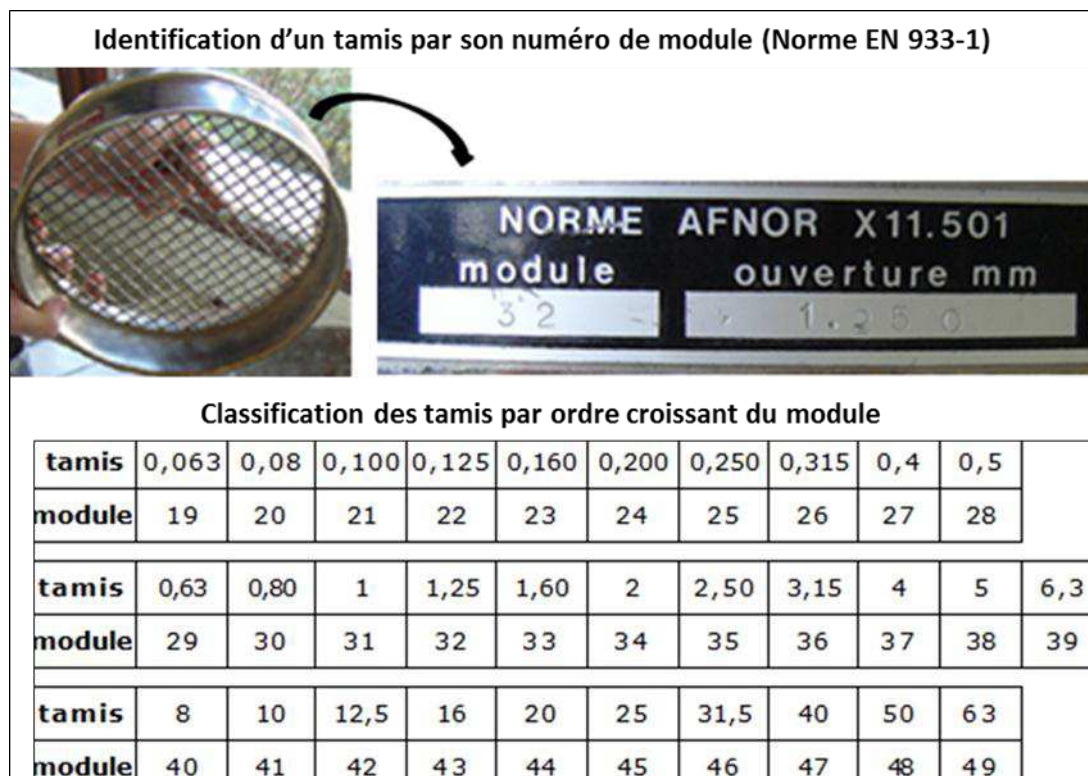


Figure 64. Classification des tamis selon la norme AFNOR.

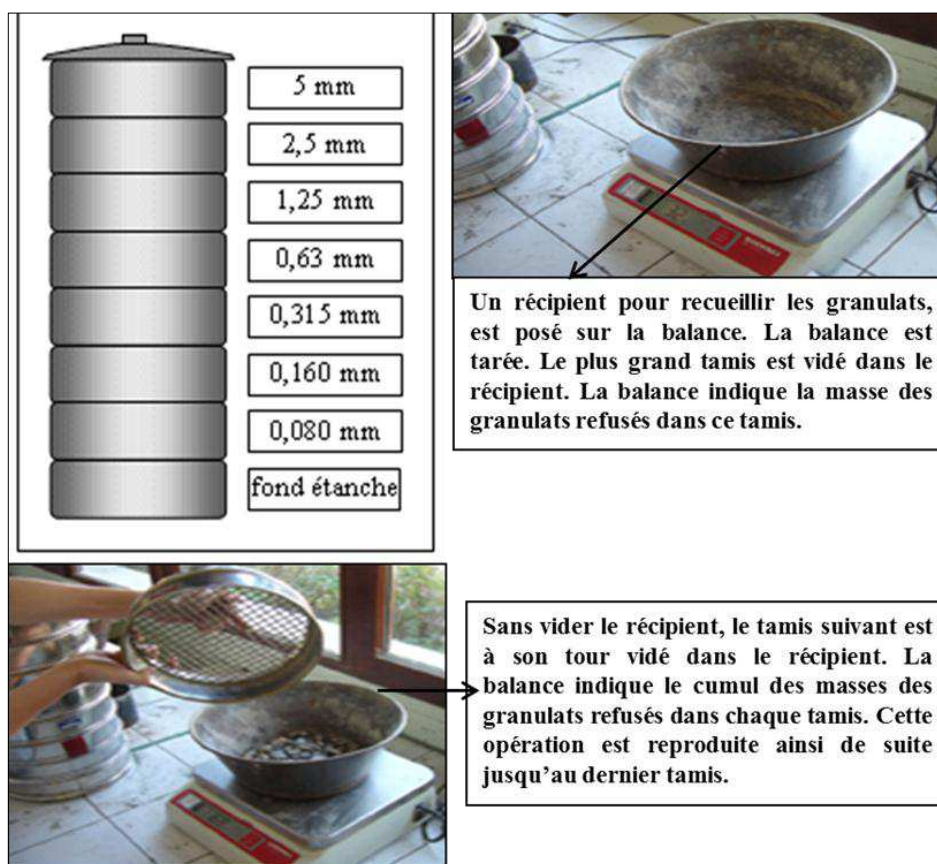


Figure 65. Analyse des prélèvements sédimentaire au laboratoire, méthode de tamisage.

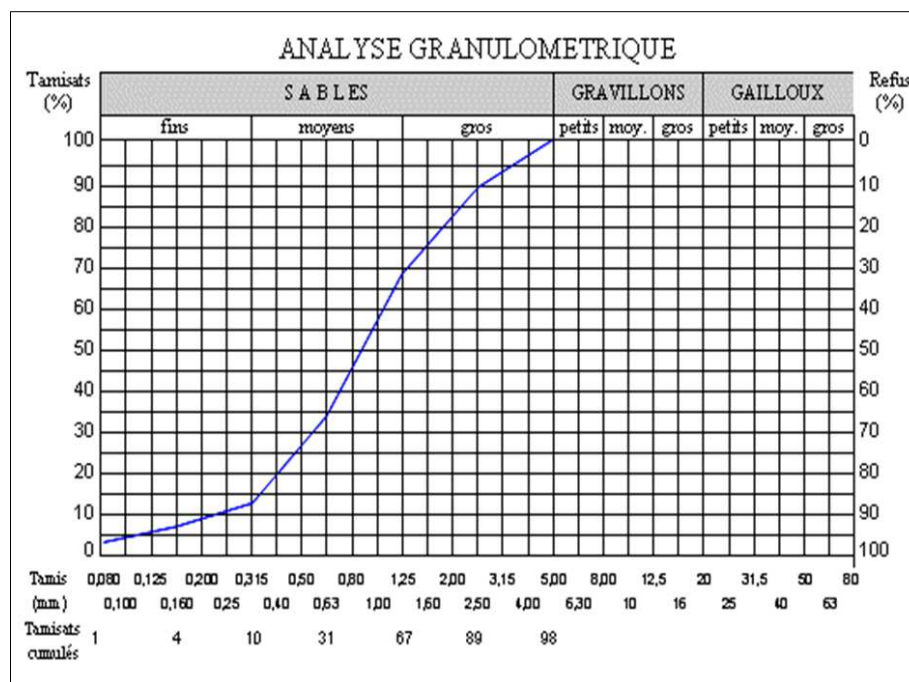


Figure 66. Exemple de reconstitution d'une courbe granulométrique.

La masse de chaque classe granulométrique est indiquée en pourcentage de la masse totale de la matière sèche de l'échantillon étudié. La courbe représentant la distribution granulométrique des éléments doit être tracée de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points. La somme des masses cumulées ne doit pas différer de plus de 1 % de la masse initiale de l'échantillon. Cela permet d'observer et de vérifier si les pertes et les imprécisions liées à la manipulation sont dans des proportions.

Le tamisage électronique

Cette analyse concerne les échantillons de moins de 1.6 mm de diamètre (déjà classés et séparés dans l'étape précédente). L'analyse s'effectue au moyen d'un granulomètre-laser (marque Coulter).

Nous avons utilisé la méthode CM de Passega, (1957), afin de mettre en relation les dépôts sédimentaires et le mode de transport. Cette méthode est largement utilisée en géomorphologie fluviale (sur les rivières du bassin du Rhône : **Bravard, 1987 ; Peiry, 1988 ; Salvador, 1991 ;** et sur la Loire **Gautier et al., 2001**). Elle consiste à extraire deux paramètres de la courbe granulométrique : la médiane (M) et le percentile le plus grossiers (C). ces deux paramètres sont portés sur un diagramme semi-logarithmique.

Les différentes informations issues de l'analyse granulométrique : mode de transport, taille des grains, conditions hydrologiques de dépôt seront utilisées dans l'analyse du transport solide (calcul du débit d'entraînement des sédiments). Il s'agit d'effectuer une cartographie

des stocks sédimentaire de définir leurs caractéristique granulométriques et d'estimer le débit d'entraînement des grains. Cela permet d'avoir une idée sur la capacité de transport. Les résultats obtenus seront mis à la disposition des gestionnaires du fleuve afin d'orienter les travaux de restauration dans le lit mineur.

2.2.1.2 Mesure des éléments grossiers « le jard » :

Il s'agit d'analyser et de décrire le contexte géomorphologique qui caractérise l'évolution et la répartition spatiale de la charge solide grossière (galets), cette analyse a été mise en œuvre sur le terrain pour étudier le transport des matériaux grossiers.

On distingue de manière générale :

- **le marquage de galets au moyen de peinture et peinture fluorescente**, cette technique peut être utilisée pour une large gamme de matériaux (Yano *et al.*, 1969). Une gamme de couleur a été expérimentée par (Shumman *et al.*, 1977). Cette technique est simple et peu coûteuse ;
- **les traceurs radioactifs**, technique utilisée pour la première fois vers la fin des années 1950, cette technique est utilisée pour étudier les petits hydrosystèmes.
- **Traceurs magnétiques** (artificiels ou naturels) ;
- **Technique de radio transmission**, très coûteuse qui peut être appliquée pour étudier une large gamme de matériaux.

L'efficacité de ces différentes méthodes est étroitement liée au taux de récupération des traceurs et à l'épaisseur de la couche active (dépôts de sédiments mobilisés). Par ailleurs Leopold (1996), met en évidence l'existence d'une corrélation entre l'intensité ou la force de l'écoulement et le taux de récupération des traceurs (Leopold *et al.*, 1966). D'autres auteurs comme (Laronne *et al.*, 1976) mettent en évidence une relation entre la taille des galets et le taux de récupération variant entre 100 % pour les grandes particules et moins de 0,5 % pour les particules les plus petites.

Nous avons opté dans le cadre de notre travail de terrain pour la technique de marquage de galets au moyen de la peinture (Keller, 1971 ; Bluck, 1982 ; Bravard, 1985 ; Gautier, 1992). Cette technique simple et peu coûteuse répond aux objectifs mis en place à l'amont de notre travail de recherche. Le site atelier concerné par ces mesures est La Charité-sur-

Loire. Le marquage des galets est effectué sur une parcelle de 1 m² (la largeur des bancs de galets ne dépasse pas 5 m), nous avons utilisé deux couleurs le rouge et le vert en fonction de l'emplacement des points de mesures. Nous disposons de 5 parcelles réparties sur le site. Notre objectif est de mesurer la distance parcourue par les galets après un événement hydrologique et de décrire le contexte sédimentaire et géomorphologique de ces dépôts. Cette approche apporte un ensemble d'éléments de compréhension concernant la capacité de transport du cours d'eau (la compétence).

Nous avons utilisé la méthode appliquée par **Kellerhals et Bray (1971)**, cette technique consiste à mesurer 100 éléments à l'intérieur d'un cadre de 1 m² des galets peinte. Le choix des 100 individus étant imposé par les 100 intersections définies par des cordelettes tendues tous les 10 cm sur les côtés du cadre.

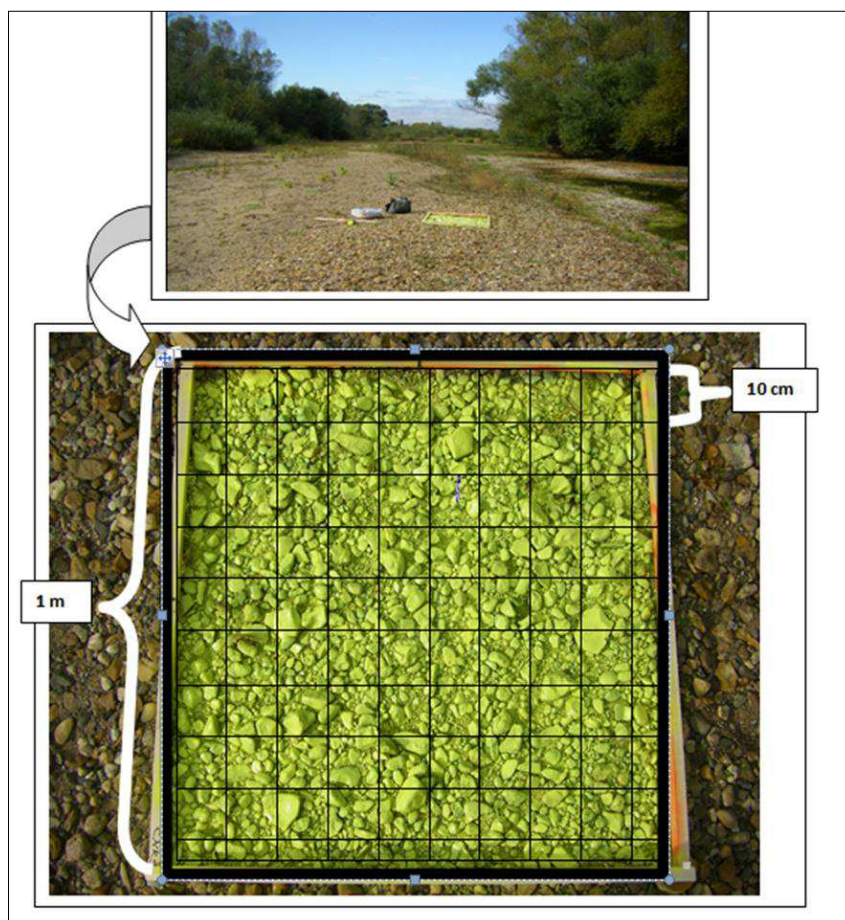


Figure 67. Protocole de mesure des galets selon la méthode appliquée par Kellerhals et Bray (1971).

2.2.1.3 Mesures du flux de matières en suspension

On ne peut établir un protocole pour mesurer la charge solide transitant en suspension dans un cours d'eau sans prendre en compte la complexité de l'évolution spatio-temporelle de cette charge. Depuis une quarantaine d'années, de nombreux chercheurs ont tentés d'évaluer la charge sédimentaire transportée en suspension (**Passega, 1963 ; Bravard et Petit, 1998 ; Kington, 1998**). Ces derniers mettent en évidence l'existence d'un gradient de concentration et de granulométrie des sédiments, ce gradient décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du fond, on parle de « la suspension graduée » qui peut atteindre jusqu'à 20 m tel est le cas dans le Mississippi (**Passega, 1963**). Au-dessus de cette couche se développe la suspension uniforme, c'est-à-dire que la concentration des sédiments se répartit uniformément sur la section mouillée. En période de faible hydraulicité et en l'absence de la suspension graduée, la suspension uniforme se développe sur l'ensemble de la colonne d'eau. Pailleurs, **Einstein (1950)**, et **Bagnold (1966)**, indiquent que les particules ne peuvent se maintenir en suspension que par la présence de turbulence dans l'écoulement. **Passega (1957)**, a démontré que dans les organismes turbulents, la taille des M.E.S prélevées en flux ne s'organise pas en fonction de la profondeur. Une étude plus récente sur le Rhône (**Antonelli, 2002**), montre qu'au-delà d'un débit de $2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, la relation M.E.S-débit change c'est-à-dire que la concentration de M.E.S est instable. Selon **Walling (2000)**, la granulométrie de M.E.S est d'avantage contrôlée par la diversité lithologique du bassin versant (la capacité de production sédimentaire) et par la taille des sédiments stockés sur les berges et dans le chenal que par les débits et les paramètres hydrauliques du cours d'eau. **Walling** constate également que les crues permettent l'arrivée massive de sédiments plus grossiers pendant la phase de montée des eaux. Cependant, en 1984, **Klein** met en évidence des phases de décrue plus chargées que les phases de montée des eaux.

Variabilité temporelle de MES :

Des études fines réalisées sur la Seine, Garonne et le Rhône (mesures quotidiennes) mettent en évidence une disparité des transports hydrauliques et sédimentaires (**Meybeck, et al., 1999**). Les résultats de ces études montrent que si 50 % du volume d'eau sont

écoulés en 20 % du temps, 1 % du temps peut suffire pour évacuer 50 % des flux, de ce fait les courbes de durée sont très révélatrices du régime de transport de M.E.S : plus le bassin est petit plus les transferts sédimentaires s'effectuent sur de très courtes durées. La combinaison de très forts débits et de concentrations extrêmes conduit parfois à des flux journaliers maximums 100 à 1000 fois supérieurs aux flux médians (observés 50 % du temps), d'où l'intérêt d'augmenter la fréquence des mesures lors des événements hydrologiques importants (crue, hautes eaux).

Pour mener à bien les opérations de prélèvements de M.E.S, il faut prendre en compte l'évolution des débits dans le temps. La fréquence des prélèvements doit être plus importante en période des hautes eaux et lors des crues (forte turbulence de l'écoulement). De plus ces prélèvements doivent s'effectuer le long de la colonne d'eau pour avoir une bonne estimation du flux solide transitant dans une section mouillée.

Protocole de prélèvement des échantillons :

Nous avons effectué trois prélèvements le long de la colonne d'eau. Cette opération est répétée dans trois endroits le long de la section transversale du chenal principal (rive droite, milieu du chenal et rive gauche), 9 prélèvements sont ainsi effectués au sein de la section mouillée. Deux campagnes de mesures ont été réalisées par mois sur une période de 12 mois. Sur le site d'étude de La Charité-sur-Loire, nous avons réalisé des prélèvements de M.E.S le long de la section transversale au sein du chenal principal. Ces mesures (*in situ*) ont été effectuées le long d'un profil transversal au niveau de la connexion aval du chenal principal avec le bras situé en rive gauche à la hauteur de « Passy ».

Ce protocole permet d'évaluer à la fois le flux de M.ES transitant dans le chenal principal en prenant en compte l'influence du bras secondaire qui fait l'objet d'autres mesures *in situ* (voir fig 1).

Nous avons réalisé lors de la crue de novembre 2008 (au niveau du pont de La Charité-sur-Loire) des prélèvements à fréquence horaire. Ces derniers concernent la première lame d'eau (les 50 premiers centimètres). L'objectif est d'analyser l'évolution des concentrations

de la charge solide transportées en suspension en fonction de la variation horaire des débits.

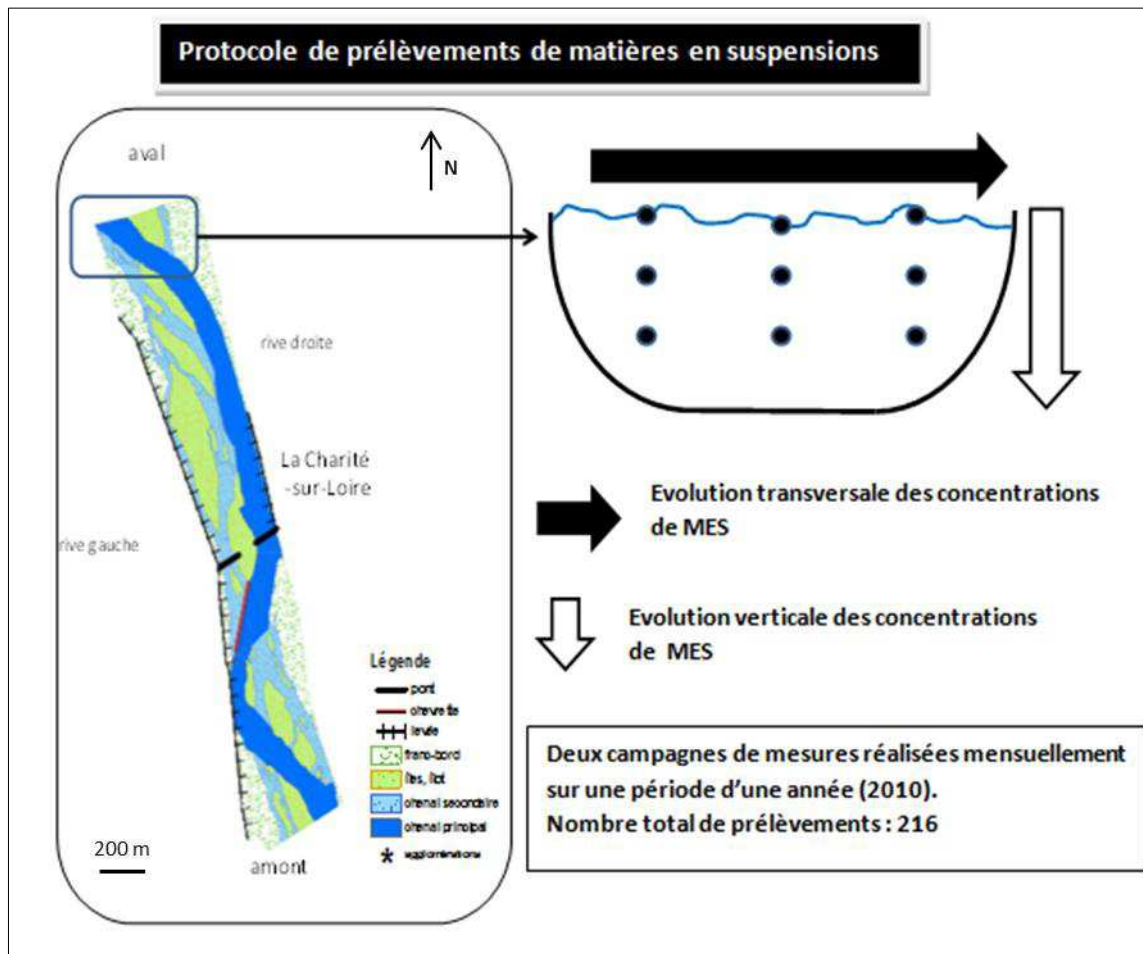


Figure 68. Localisation des points de prélèvements des matières en suspension (site ateliers de la Charité).

L'outil de prélèvement

Pour mesurer la concentration des sédiments transportés en suspension dans le chenal principal, nous avons utilisé un préleveur d'eau de type **Watertrap**. Ce dernier a été conçu pour prélever des échantillons représentatifs dans les eaux courantes jusqu'à une profondeur d'environ 25 mètres. Ce dispositif, en acier inoxydable, piège un échantillon d'une colonne d'eau horizontale en mouvement à un instant et à une profondeur donnée. La profondeur de l'échantillonnage est lue sur un compteur « profondimètre ». Grâce à ses lests mobiles et son empennage réglable, le préleveur peut être orienté dans une position voulue, en fonction de la direction du courant.

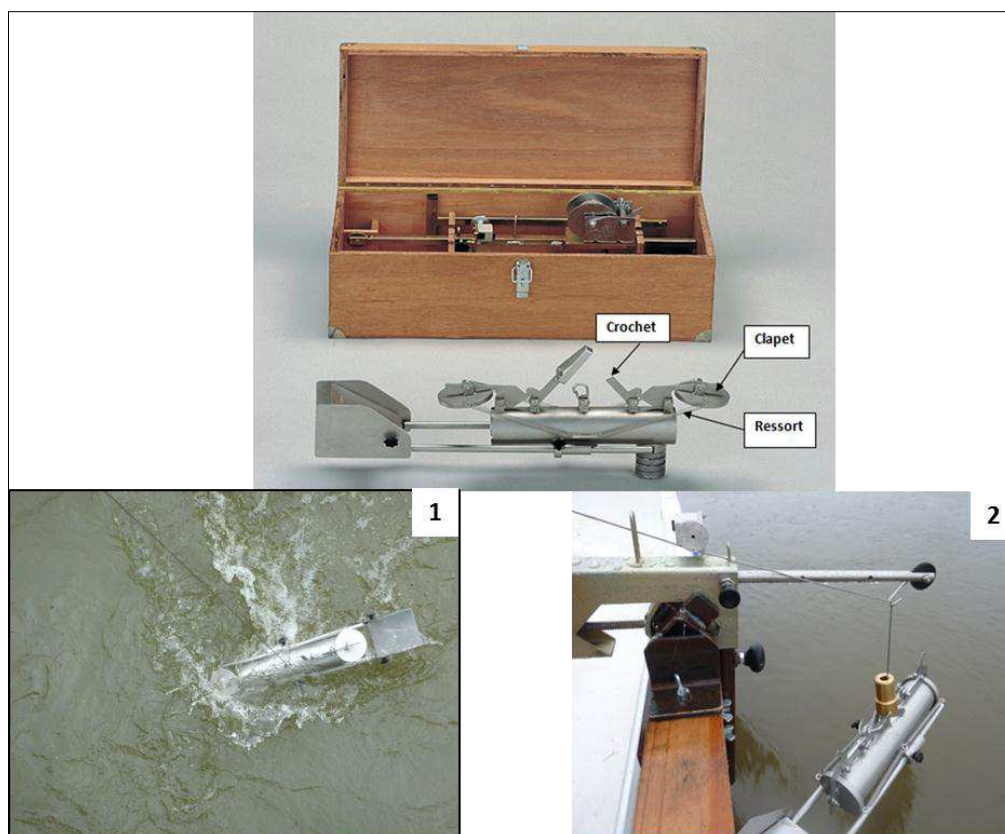


Figure 69. Prélèvement de matières en suspension, (1) mise en eau du préleveur, (2) récupération de l'échantillon.

L'analyse des prélèvements, cette approche permet d'effectuer : l'estimation du volume de la charge solide transportée en suspension en fonction de la variation des débits, l'analyser la variation transversale et verticale de M.E.S au sein de la section transversale, déterminer le débit à partir duquel on obtient un gradient de concentration de M.E.S et analyser la variation saisonnière de M.E.S.

La concentration en éléments non dissous des échantillons prélevés dans le chenal principal est obtenue par la méthode de filtration (**norme NF EN 872**). Les volumes d'échantillons filtrés varient de 250 à 1000 ml. Cette analyse est effectuée au Laboratoire de chimie du LGP. Les échantillons sont analysés dans les 24 h qui suivent le prélèvement. Nous avons utilisé un système de filtration sous vide.

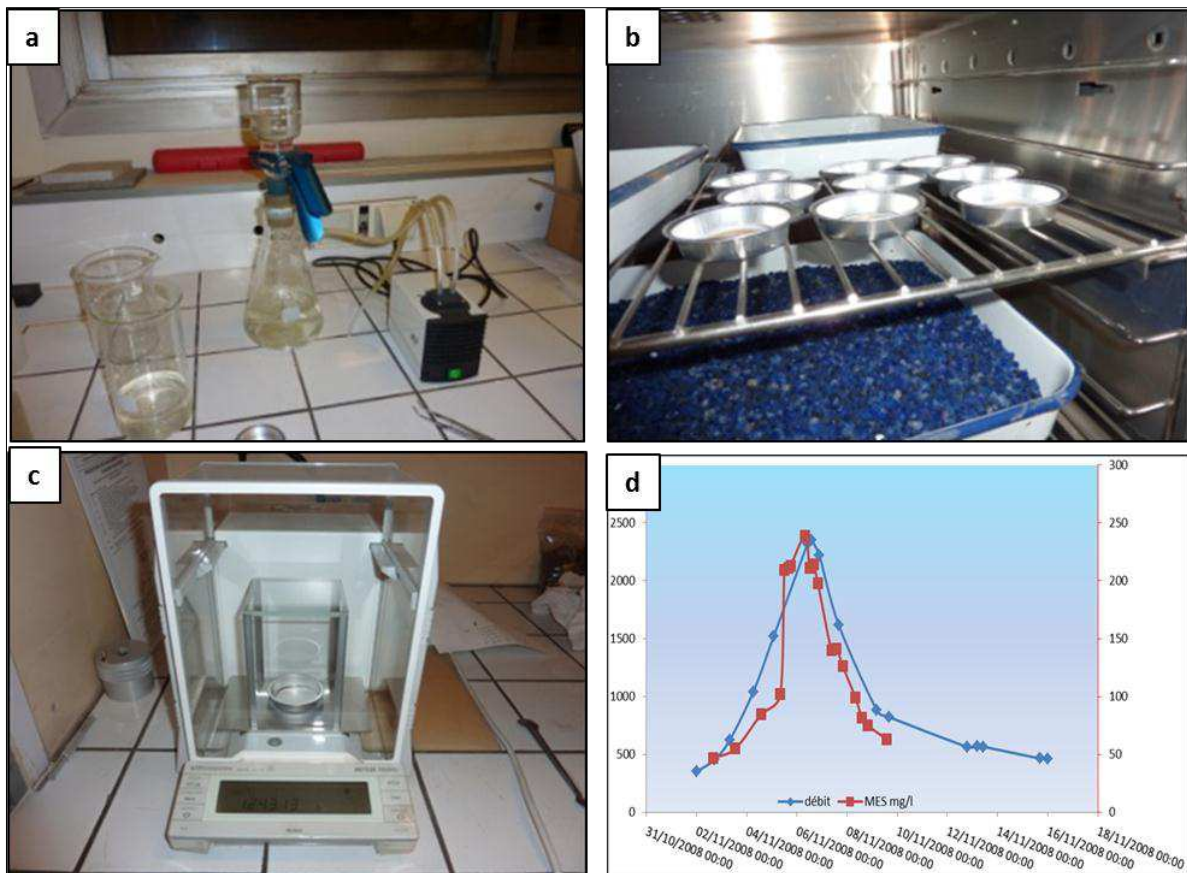


Figure 70. Protocole d'analyse des prélèvements de M.E.S.

(a) Filtration de l'échantillon, (b) Séchage des échantillons, (c) Pesé de l'échantillon (précision de la balance : 1 microgramme), (d) réalisation de la courbe de concentration de M.E.S.

Tableau 11. Récapitulatif des méthodes et outils de mesures et de traitement de données

Informations géographiques	Outils de mesures	logiciels	Objectifs
<ul style="list-style-type: none"> - La topographie - L'évolution des formes fluviales - L'évolution du couvert végétale - L'impact des aménagements - Le transport solide 	<ul style="list-style-type: none"> - DGPS - Échosondeur - Préleveur MES - Ballon captif - Marquage de galet - prélèvement sédimentaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Arc-Gis 9.1 - GNSS Solutions - High Pack - Excel - Photoshop 	<p>Etudier :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'évolution topographique au sein de la bande active - L'impact de la végétation - L'impact géomorphologique des travaux de restauration - Influence des ouvrages fluviaux sur l'évolution morpho-sédimentaire

Conclusion

Comme nous l'avons souligné précédemment, le protocole de mesures et d'analyse s'adapte à la problématique de la thèse et tient compte des moyens matériels disponibles (coût, matériels disponible et temps de réalisation). Nous avons rassemblé à travers les recherches bibliographiques et l'acquisition de données sur le terrain des informations susceptibles d'aider à la compréhension des processus morpho-sédimentaires à l'échelle des sites d'études et de la Loire moyenne (profils des lignes d'eau). Les différentes méthodes de mesures et d'analyses ont été choisies après une recherche bibliographique approfondie.

Nous avons mis en œuvre un protocole de mesure et d'analyse afin de mettre en évidence différentes informations géographiques : les études antérieures, la documentation cartographique, les images aériennes, les outils informatiques (SIG) et les outils de mesures (DGPS, station totale, préleveur et échosondeur).

Le croisement des résultats des différentes approches a permis d'aboutir à une analyse globale relative à l'évolution hydromorphologique de la bande active. Cela a permis la réalisation d'un diagnostic géomorphologique en vue d'analyser le réajustement fluvial engendré par : l'impact des modifications d'origine anthropique (aménagements anciens, extraction de granulats...) et naturelle (assouplissement hydrologique et végétalisation du lit). Ce protocole d'analyse tient également en compte la réponse géomorphologique des sites ateliers suite aux travaux d'entretien et de restauration. Ces secteurs ont fait l'objet d'une étude détaillée.

L'analyse à moyenne échelle (pluri-décennale) a été réalisée aux moyens de la photo-interprétation et de la comparaison des profils de la ligne d'eau. Cette technique a permis la reconstitution de l'évolution spatio-temporelle des formes fluviales au sein du lit mineur, l'analyse de l'impact des ouvrages fluviaux sur la dynamique hydro-sédimentaire et l'analyse de l'évolution topographique du chenal principal.

L'analyse à grande échelle (interannuelle) : les données topographiques, bathymétriques et granulométriques ont été utilisées conjointement afin de mesurer les processus d'érosion et de sédimentation à l'échelle fine. Nous nous sommes appuyés sur une base de données

constituée de mesures de terrain à haute résolution altimétrique (DGPS) et spatiale (ballon captif). Les méthodes d'analyses employées sont fréquemment utilisées en géomorphologie fluviale. Les résultats obtenus ont apportés des éléments explicatifs de l'évolution des formes fluviales. Cela nous a permis d'établir un bilan sédimentaire au sein de nos sites d'études et d'évaluer les incidences des différents aménagements et enfin préconiser quelques orientations de restauration, de mieux cibler et d'orienter les travaux d'entretiens du lit. Les différents résultats seront détaillés dans les chapitres suivants.

Première partie

Chapitre 3. L'impact des extractions de granulat sur l'évolution verticale du plancher alluvial, croisement de deux approches à moyenne échelle.

Ce chapitre est consacré à l'analyse du réajustement de la Loire moyenne plus de dix ans après l'arrêt des extractions de granulat effectué dans le lit de la Loire, particulièrement dans le lit mineur. Il s'agit de déterminer (de l'amont à l'aval) l'intensité des extractions (les quantités prélevées), la répartition spatiale des sites d'extractions dans le lit mineur de la Loire (la densité) et les durées de leur mise en service. Les résultats de cette analyse sont mis en relation avec les processus d'évolution topographique du fond du chenal principal (issus de la comparaison des profils des lignes d'eau). Cette approche permet de déterminer l'impact des extractions de granulat sur l'évolution morpho-sédimentaire et les modalités d'ajustement du plancher alluvial.

1. Les extractions de granulat dans la Loire et ses affluents

Des prélèvements qui aggravent le déséquilibre sédimentaire.

Comme de nombreux fleuves français, la Loire a fait l'objet d'extractions massives de granulat. Ces prélèvements concernent une période d'environ 46 ans (1949 à 1995). Les extractions de matériaux ont été effectuées dans le lit de la Loire pour répondre aux besoins du pays en matière de construction. Les volumes extraits pour renforcer les digues sont dans l'ensemble réduits au regard des masses prélevées pour l'industrie du bâtiment. Les différentes études réalisées dans le but d'estimer les volumes de ces extractions sont plus précises pour les prélèvements de sédiments effectués entre 1981 à 1993 en raison de la disponibilité des données (**Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995**). On dispose pour cette période d'une localisation précise des sites d'extractions et des volumes annuels des extractions de matériaux par site. Pour cette raison nous avons opté pour une analyse en deux parties : période antérieure à 1981 et période postérieure à 1981. Selon les auteurs de ces études, les quantités de matériaux sont souvent sous-évaluées par rapport aux volumes réellement prélevés dans le fleuve.

Nous proposons à l'issus de ce chapitre une analyse synthétiques en s'appuyant sur les données des différents rapports et études réalisés en vue d'évaluer les quantités de granulats à l'échelle du bassin versant de la Loire et aussi sur les données des profils en long des lignes d'eau.

Nous présentons dans un premiers temps un nouveau bilan des extractions de granulat à l'échelle du bassin de la Loire. Cela afin de mettre en évidence la part des prélèvements réalisés dans la Loire par rapport à ses principaux affluents. La seconde étape de l'analyse concerne les prélèvements réalisés dans le lit majeur de la Loire entre 1981 et 1993. Enfin une analyse des prélèvements de sédiments effectués dans le lit mineur de la Loire entre 1949 et 1995.

L'apport de la présente analyse se résume aux points suivants :

- fournir au gestionnaires un document de synthèse (jusqu'à présent inexistant) relatif aux quantités de granulat extraites dans le bassin de la Loire,

- effectuer une analyse qualitative des modalités d'extractions à l'échelle du bassin de la Loire (la Loire et ces affluents) et à l'échelle de la Loire,
- mettre en relation les résultats des deux analyses précédentes (les analyses quantitative et qualitative) avec les résultats de l'analyse diachronique de l'évolution verticale des lignes d'eau en Loire moyenne.

Cette approche permet d'évaluer la quantité globale du matériel granulaire extrait à l'échelle du bassin de la Loire et de déterminé (sur la Loire) les secteurs à forte exploitation (le degré de pression sur le stock sédimentaire). Le croisement des résultats de cette analyse avec ceux de l'évolution des profils des lignes d'eau réalisés à l'échelle de la Loire moyenne permet de mettre en lumière l'influence des extractions de granulat sur les processus d'ajustement vertical du plancher alluvial.

1.1 Les extractions de granulat dans le bassin de la Loire : quantités extraites dans les lits de la Loire et de ces affluents (1981 - 1993)

Une forte exploitation des sédiments de la Loire, particulièrement dans le lit mineur.

a. Dans les lits majeurs de la Loire et ces affluents

La comparaison de la quantité du matériel granulaire prélevés dans le lit majeur de la Loire et de ses principaux affluents (L'Allier, le Cher, L'Indre, la Maine, la Vienne et l'Arroux) met en évidence une prédominance des sédiments extraits dans le lit majeur de la Loire. Elles sont évaluées à 66,18 millions de tonnes, soit 44,86 % du total des extractions qui s'élève à 147,51 millions tonnes. L'Allier occupe la seconde position avec 43,8 millions tonnes soit 29,69 %. Il est suivi par le Cher avec 18,15 millions de tonnes, soit 12,3 %. On retrouve en quatrième position la Maine avec 10,56 millions de tonnes, soit 7,15 %.

Pour L'Arroux, la Vienne et L'Indre, les volumes de matériaux prélevés sont nettement inférieurs à ceux des quatre cours d'eau cités précédemment. Ils représentent respectivement, 4,72 millions de tonnes, 2,29 millions de tonnes et 1,8 millions de tonnes, soit 3,2 %, 1,55 % et 1,22 %. On distingue donc deux groupes de rivières en fonction du volume global prélevés dans le lit majeur : un premier groupe constitué de la Loire, l'Allier, le Cher et la Maine, faisant l'objet d'extractions importantes avec des écarts de :

22,38 millions de tonnes entre la Loire et l'Allier, 25,65 millions de tonnes entre l'Allier et le Cher et 7,6 millions de tonnes entre le Cher et la Maine.

Le second groupe est constitué de L'Arroux, L'Indre et la Vienne, les valeurs des extractions de granulats sont moins importantes. La répartition spatiale et la densité des extractions peuvent être mises en relation avec la proximité des grandes villes comme Tours, Orléans et Angers.

b. Dans les lits mineurs de la Loire et ces affluents

L'exploitation de granulats dans les lits mineurs de la Loire et de ses affluents ne semble pas suivre la logique constatée pour les prélèvements dans les lits majeurs à l'échelle du bassin versant. On constate un écart considérable entre la quantité de sédiment prélevée dans le lit de la Loire par rapport à ces affluents. La Loire arrive en tête de liste avec une valeur estimée à 58 millions de tonnes, soit 93,9 % du total des extractions. Le Cher occupe cette fois la seconde place avec 2,7 millions de tonnes, soit 4,35 % (une valeur nettement inférieure à celle de la Loire). L'Allier arrive en troisième position avec une valeur de 0,6 millions de tonnes, soit 0,97 %. Il est suivi par Vienne et L'Arroux avec des valeurs respectives de 0,45 et 0,02 millions de tonnes, soit 0,72 % et 0,03 %. L'Indre et la Maine n'ont pas fait l'objet d'extractions de matériaux au cours de cette période (figure 71).

L'analyse des valeurs relatives aux tonnages extraits par kilomètre de cours d'eau (dans le lit mineur) met en évidence une forte pression exercée sur le stock sédimentaire de la Loire. L'exploitation du matériel granulaire dans ce cours d'eau représente environ 57226 tonnes/km, soit 85 % des sédiments extraits dans les lits mineurs à l'échelle du bassin versant entre 1981 – 1993. Le Cher a fait l'objet d'une exploitation d'environ 7321,5 tonnes/km, soit 11% du total prélevé. Les valeurs enregistrées pour L'Allier, La Vienne et L'Arroux sont relativement faibles, soit des valeurs variant entre 0,2 et 2 % (voir figure).

L'analyse des données quantitative relative aux extractions de sédiments dans le bassin de la Loire montre donc une forte exploitation du matériel granulaire dans le lit mineur de la Loire comparé aux extractions réalisées dans les lits mineurs de ces affluents. Cela implique des incidences plus importantes sur le stock sédimentaire disponible au sein du lit de la Loire. D'un point de vue géomorphologique, les extractions de granulats dans le lit

mineur ont un effet direct sur l'évolution topographique du fond du chenal principal. Les fosses d'extraction provoquent un déséquilibre morphosédimentaire. Il en résulte un abaissement général du plancher alluvial. La vitesse d'incision du cours d'eau dépend en partie de la quantité et de la fréquence des extractions de granulat dans le lit mineur.

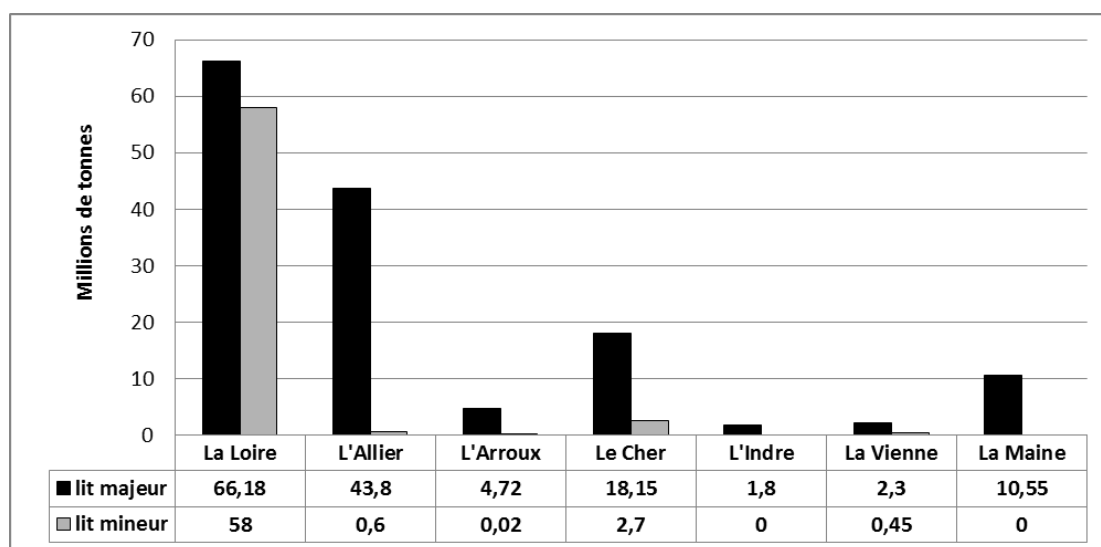


Figure 73 Extractions de matériaux exprimées en millions de tonnes dans les lits majeurs et mineurs de la Loire et de ces affluents entre 1981 et 1993. (Source des données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

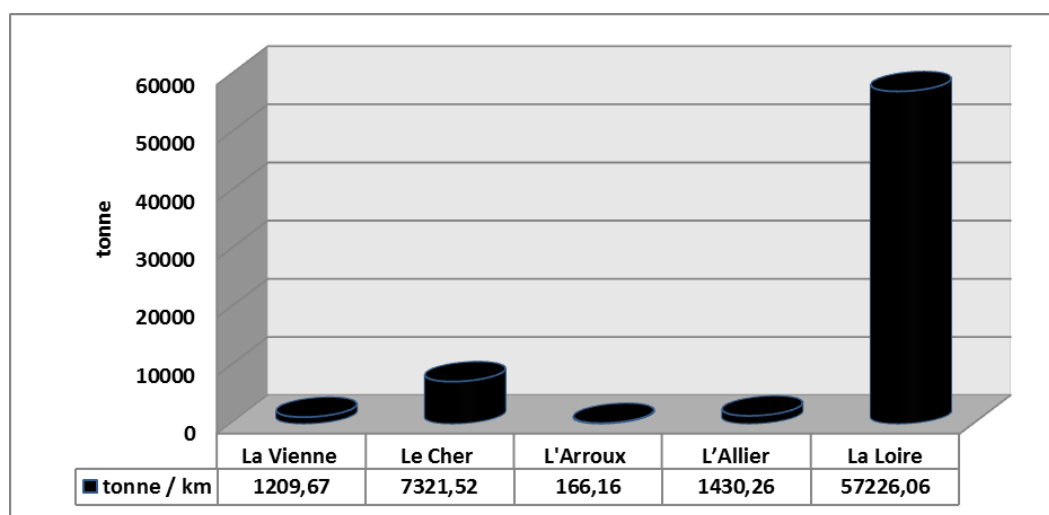


Figure 74 Extractions de sédiments en tonne /km dans la Loire et ces affluents entre 1981 et 1993.

Ces valeurs concernent les extractions effectuées dans les lits majeurs et mineurs.

Tableau 12. Rythme annuel des extractions de granulat dans les cours d'eau du bassin de la Loire (1981 – 1993)

	Taux annuel	
Cours d'eau	Lit majeur (Mt)	Lit mineur (Mt)
La Loire	5,5	4,83
L'Allier	3,6	0,05
L'Arroux	0,39	0,001
Le Cher	1,51	0,22
L'indre	0,15	0
La vienne	0,19	0,03
La Maine	0,87	0

1.2 Les extractions de matériaux dans en amont du Bec d'Allier entre 1981 et 1993 (Loire, Nièvre...)

L'estimation du matériel alluvionnaire prélevé dans le lit mineur de la Loire est basé sur des séries de données concernant : une période allant de 1981 à 1993 pour la partie amont de la Loire (amont du Bec d'Allier) et de 1949 et 1994 pour la Loire moyenne et la basse Loire (du Bec d'allier à Nantes). On ne dispose pas d'informations relatives aux extractions effectuées dans la Loire amont avant 1981. De ce fait, on suppose que le volume global des matériaux prélevés à l'échelle de la Loire est sous-évalué (**Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995, page 15**) notent dans leurs rapports : « *les quantités approximatives, en milliers de tonnes, dont l'extraction a été autorisée de 1960 à 1980 ont été relevées sur un graphique figurant dans l'étude Hvdratec d'octobre 1984, établi par interpolations linéaires entre des quantités connues pour certaines années comme on les a estimées 1949. Les informations récoltées par différentes sources présentent dans certains cas des valeurs approximatives* ».

a. Les extractions effectuées dans le lit majeur

Les extractions de granulat effectuées dans le département de Loire représentent 21,86 millions de tonnes, soit 70,5 % du total des extractions réalisé en Loire amont. Le département de la Nièvre occupe la seconde place avec une valeur estimée à 3,44 millions

de tonnes, soit 11 %. Suivi immédiatement par le département de la Haute Loire où on enregistre 3,13 millions de tonnes soit 10 %. Les quantités prélevées dans les départements de la Saône et Loire et de l'Allier sont respectivement de l'ordre de 1,5 et 1,14 millions de tonnes, soit 4,7 % et 3,7 %.

L'évolution annuelle des extractions de matériaux varie d'un département à un autre. On enregistre pour le département de Loire trois phases d'évolutions : une réduction considérable des volumes de sédiments prélevés entre 1981 et 1985, en l'espace de ces cinq années, on passe de 2,34 millions de tonnes à 1,6 millions de tonnes, soit une réduction 0,7 millions de tonne. Pour le département de la Nièvre la tendance est inversée, on constate une augmentation progressive des extractions à partir de 1985 jusqu'à 1989, les estimations indiquent pour cette période des valeurs passant de 109 (1985) à 758 milles tonnes (1989). Cette valeur chute à 329 milles tonnes en 1990. Entre 1990 et 1993 les valeurs d'extractions oscillent entre 329 et 528 milles tonnes, on passe en l'espace de 9 ans, de zéro à 528 milles tonnes/an. Cette augmentation est due essentiellement au transfert des extractions du lit mineur au lit majeur (**Dambre, 1995**). On enregistre pour le département de Saône et Loire deux pics : 226 milles tonnes (1982) et 225 milles tonnes 1990, pour le reste de la période des valeurs variant entre 0,03 et 0,16 millions de tonnes. On note pour le département de la Haute Loire une réduction progressive, les valeurs estimées d'extractions passent de 0,59 millions de tonnes en 1981 à 0,15 millions de tonnes en 1993. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans le département de l'Allier, elles varient entre 0,1 et 0,15 millions de tonnes. La réduction considérable constatée dans les départements de la Haute Loire, la Loire et l'Allier est due à une politique consistant à recourir aux agrégats issus des roches calcaire ou éruptives.

En constate d'après ces résultats une variation interdépartemental des valeurs des extractions : une alternance de phases de réduction des valeurs des extractions (1981 - 1985) et d'augmentation des valeurs (1985 - 1989). Les valeurs sont relativement stables entre 1990 et 1993.

b. Les extractions effectuées dans le lit mineur

L'essentiel du tonnage extrait dans le lit mineur en Loire amont s'est effectué dans le département de la Nièvre (2,6 millions de tonnes), soit 65 %. On enregistre dans les départements de la Loire, la Saône et Loire et la Haute-Loire des valeurs relativement faibles, soit respectivement 16,8 %, 17,8 % et 0,4 %. Il n'y en a pas eu d'extraction dans le département de l'Allier.

Les extractions de matériaux alluvionnaires ont connu une régression continue dans tous les départements au cours de la période 1981 – 1989, conformément aux protocoles passés entre les préfets et les représentants des exploitants sabliers (Dambre, 1995). Le tonnage extrait est passé de 0,87 millions de tonnes en 1981 à 0,37 millions de tonnes en 1985, soit une réduction de 58 % en l'espace de 4 années. L'exploitation de granulat a cessé fin 1989. En remarque que cette tendance à la diminution des extractions diffère de celle qu'a connue le lit majeur dans le même secteur. Cela est dû en grande partie au transfert des extractions dans le lit majeur après 1989 (augmentation du volume des sédiments extraits dans le lit majeur).

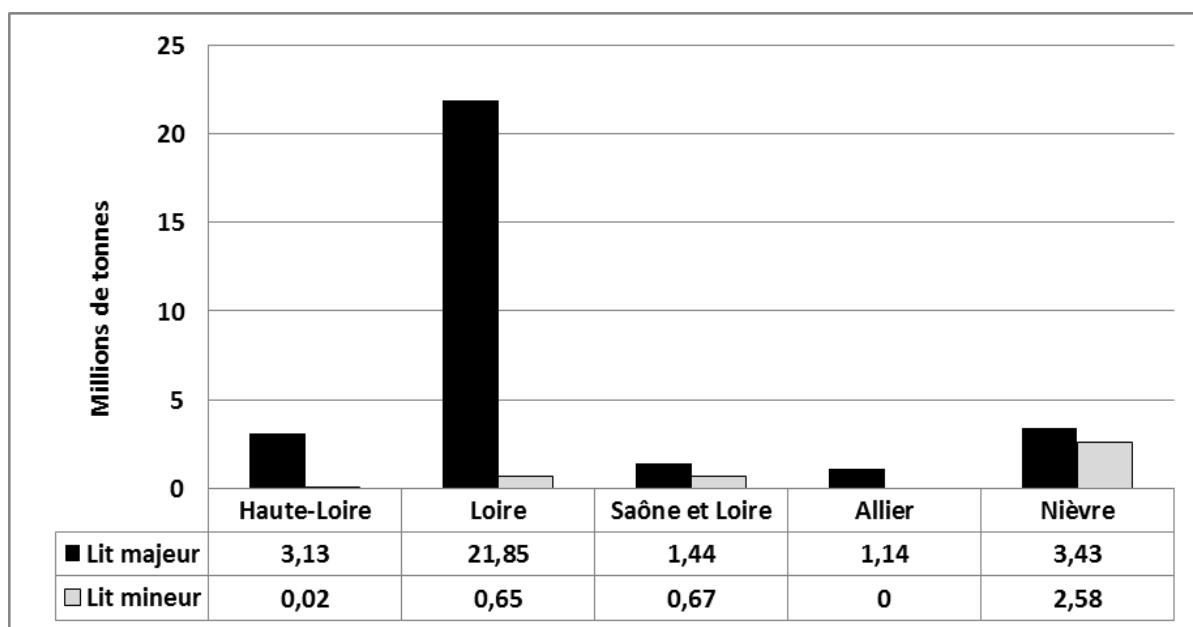


Figure 73. Extractions de matériaux par département en amont du Bec d'Allier entre 1981 et 1993. (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

Ces données concernent le lit majeur et le lit mineur. On constate une forte exploitation des sédiments dans le lit majeur, dans le département de Loire.

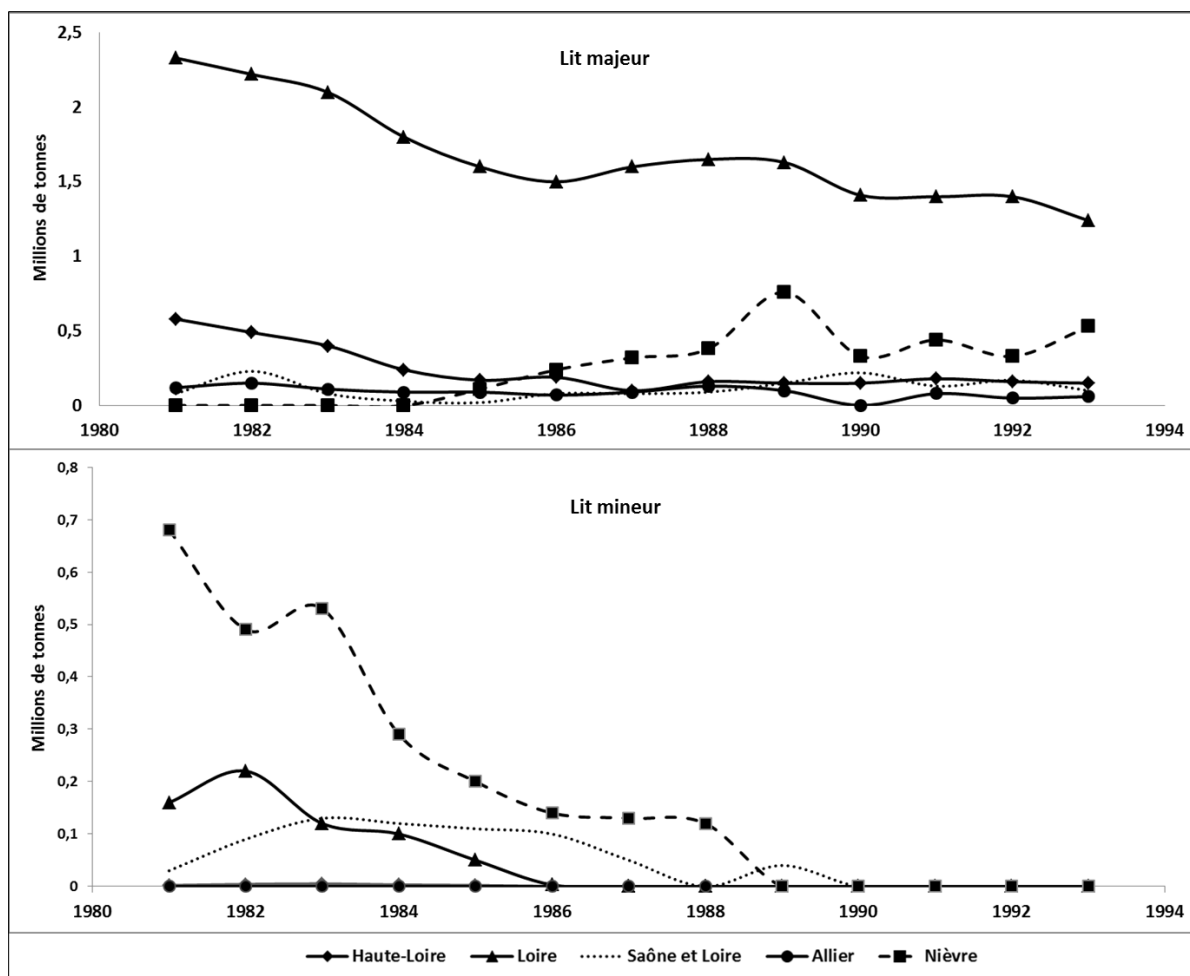


Figure 74 Évolution annuelle des extractions de matériaux par département en amont du Bec d'Allier entre 1981 et 1993, dans le lit majeur et le lit mineur (Source des données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

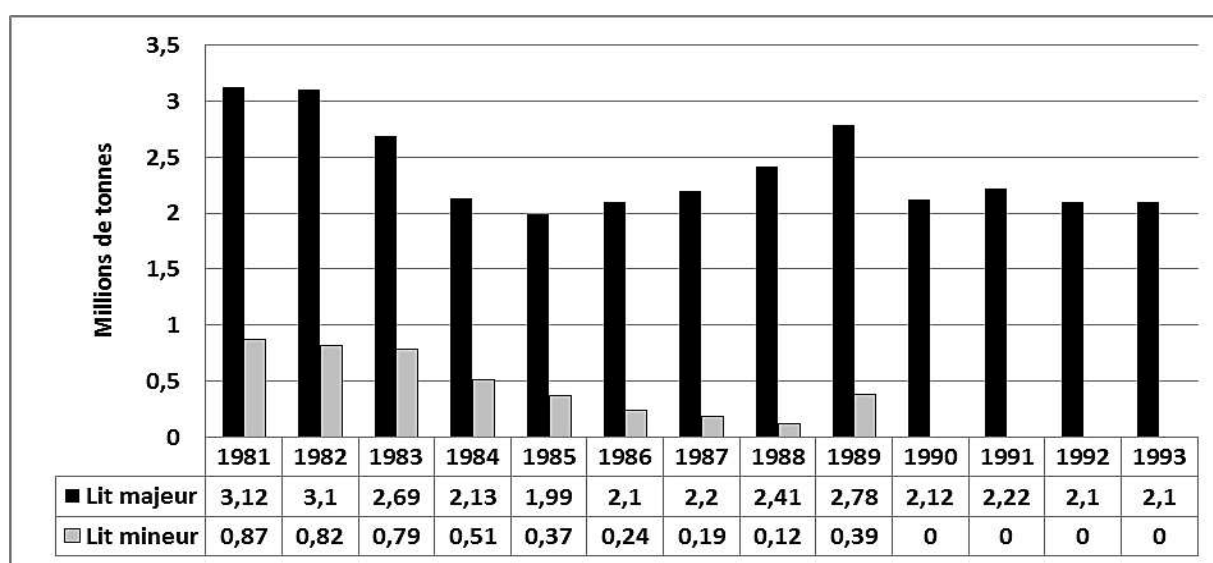


Figure 75 Évolution interannuelle des extractions de granulat en Loire amont entre 1981 et 1993 (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

1.3 Les extractions de matériaux en aval du Bec d'Allier (Nièvre, Cher, Loiret...)

Cette analyse concerne la Loire moyenne et la basse Loire (du bec d'allier à Nantes). Les données relatives aux extractions effectuées dans le lit majeur sont analysées sur une période allant de 1981 à 1993. L'analyse de l'évolution du matériel granulaire extrait dans le lit mineur est réalisée sur une période allant de 1960 à 1993 pour la Loire moyenne et de 1949 à 1995 pour la basse Loire. Cela en raison de la disponibilité des données. Les résultats sont présentés en fonction de ces trois périodes.

a. Evolution des extractions dans le lit majeur (1981 – 1993)

L'évaluation du matériel granulaire extrait en aval du bec d'allier met en évidence une exploitation relativement importante dans le département du Loiret, soit 65 % (22,7 millions de tonnes). Les valeurs relevées dans les départements de la Nièvre, du Cher, du Loir et Cher, de l'Indre et Loire sont plus faibles et relativement proches, soit un tonnage d'une valeur variant entre 7 et 8 % (2,4 à 2,9 millions de tonnes). La valeur la plus faible est enregistrée dans le département de Maine et Loire, 1,7 millions de tonne, soit 5 %.

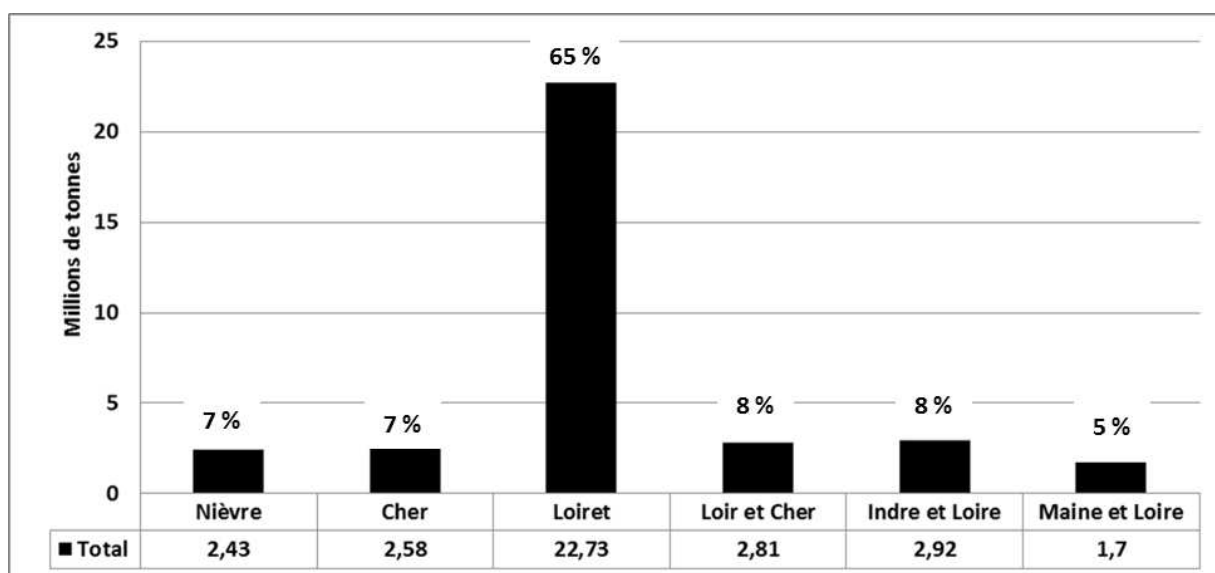


Figure 76 Extractions de matériaux par département dans le lit majeur de la Loire en aval du Bec d'Allier entre 1981 et 1993. (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

L'analyse des courbes d'évolution annuelles des extractions par département présente deux caractéristiques : une croissance des valeurs au fil des années (contrairement au mode d'évolution constaté en Loire amont) et une exploitation relativement important du stock sédimentaire dans le département du Loiret (22,73 millions de tonnes), soit un rythme d'évolution annuelle de 1,89 millions de tonnes. La proximité de l'agglomération parisienne explique une pression accrue sur le lit de la Loire dans ce secteur.

Les extractions de granulats effectuées dans les départements de la Nièvre, du Cher, du Loir et Cher, de l'Indre et Loire et Maine et Loire ont connus un rythme d'évolution d'une valeur variant entre 0,14 et 0,24 millions de tonnes par an.

La tendance de croissance des valeurs des extractions dans le lit majeur de la Loire apparait bien dans la figure 78. La valeur recensée pour l'année 1981 (0,98 millions de tonnes) représente environ le tiers de celle de l'année 1987 (3,08 millions de tonnes) et le quart de la valeur des quantités du matériel alluvionnaire extrait en 1993 (4,11 millions de tonnes). Cela reflète un besoin croissant du matériel granulaire et une volonté de puiser le plus possible dans le stock sédimentaire tant que la loi l'autorise.

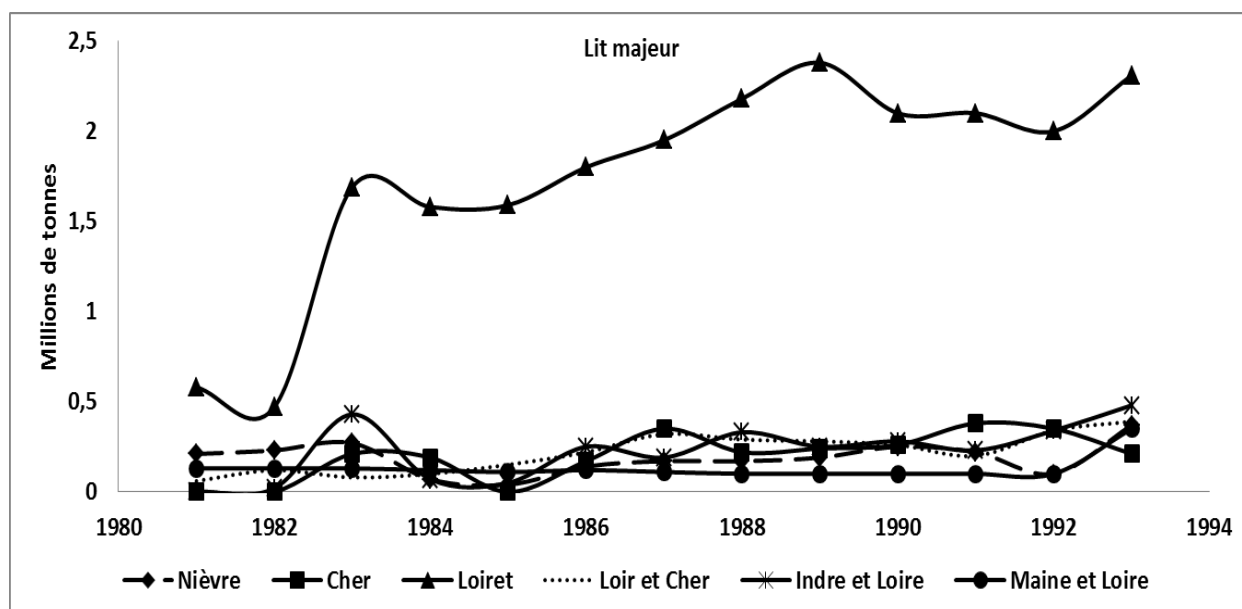


Figure 75 Évolution annuelle des extractions de matériaux par département en aval du Bec d'Allier entre 1981 et 1993. (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

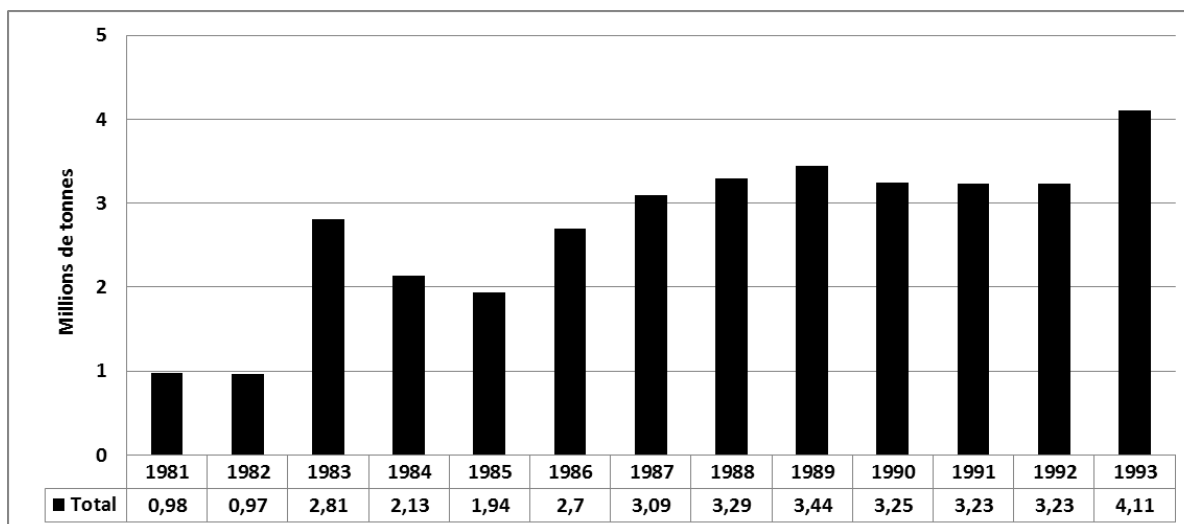


Figure 76 Évolution interannuelles des extractions de matériaux dans le lit majeurs en aval du Bec d'allier pour la période 1981 – 1993. (Source des données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

Tableau 13. Synthèse des données relatives aux quantités de granulat extrait dans le lit majeur en aval du Bec d'Allier (1981 – 1993).

Années	Départements						Total
	Nièvre	Cher	Loiret	Loir et Cher	Indre et Loire	Maine et Loire	
1981	0,21	0	0,58	0,06	0,001	0,13	0,98
1982	0,23	0	0,47	0,12	0,02	0,13	0,97
1983	0,27	0,21	1,69	0,08	0,43	0,13	2,81
1984	0,07	0,19	1,58	0,1	0,07	0,12	2,13
1985	0,04	0	1,59	0,15	0,05	0,11	1,94
1986	0,14	0,17	1,8	0,22	0,25	0,12	2,7
1987	0,17	0,35	1,95	0,32	0,19	0,11	3,09
1988	0,17	0,22	2,18	0,29	0,33	0,1	3,29
1989	0,19	0,24	2,38	0,28	0,25	0,1	3,44
1990	0,25	0,26	2,1	0,26	0,28	0,1	3,25
1991	0,22	0,38	2,1	0,2	0,23	0,1	3,23
1992	0,1	0,35	2	0,34	0,34	0,1	3,23
1993	0,37	0,21	2,31	0,39	0,48	0,35	4,11
Total	2,43	2,58	22,73	2,81	2,92	1,7	35,11

Les valeurs sont exprimées en millions de tonnes.

b. Evolution des extractions dans le lit mineur en Loire moyenne (1960 – 1995)

L'analyse de l'évolution des profils des lignes d'eau concerne une portion du fleuve au sein de laquelle se trouvent aussi nos sites d'études. Nous portons donc un intérêt particulier aux modalités d'exploitation de granulat dans ce secteur.

La figure 79 illustre l'évolution des extractions de sédiments dans les départements de la Loire moyenne (du Bec d'Allier au Bec de Vienne) sur un linéaire de 342 km. On constate une variation spatio-temporelle des volumes de sédiments extraits dans ces départements. Cela permet de distinguer trois types d'évolutions :

- **Type 1** : concerne la courbe d'évolution des prélèvements sédimentaire effectués dans le département de la Nièvre et du Cher sur un linéaire de 77 km (du Bec d'Allier à Belleville). On enregistre une augmentation progressive de 1964 jusqu'à 1972, en suite une stabilisation des valeurs aux alentours de 0,77 milles tonnes jusqu'à l'année 1978, le tonnage augmente considérablement entre 1978 et 1981 : on passe de 0,79 millions de tonnes en 1978 à 2,6 millions de tonnes 1979 et à 2,2 millions de tonnes en 1981. Ce changement brutal est dû essentiellement à l'extraction effectuée pour réaliser les plateformes de la centrale nucléaire de Belleville. D'après les relevés effectués pour mesurer le comblement des fosses d'extraction, le volume total extrait serait de 3.300.000 m³, soit environ 5 millions de tonnes, soit 70 % du total des prélèvements réalisés entre 1979 et 1981(**référence note SHC de décembre 1991 in Dambre et Malaval, 1993**). Cette augmentation correspond aussi à la multiplication du nombre de sites d'exploitations : 2 en 1960 à 5 en 1968, puis à 16-18 dans les années 1973-1981.

D'un point de vue géomorphologique ce type d'extraction peut avoir des effets locaux considérables : une grande fosse engendrant érosion régressive en amont et une érosion progressive à l'aval, déstabilisation des berges et des ouvrages et dégradation du milieu rivulaire. La réduction des volumes extraits s'est faite progressivement entre 1982 et 1992.

- **Type 2** : regroupe les courbes d'évolutions relatives aux départements du Loiret et de Loir et Cher, ces derniers ont connus une augmentation progressive jusqu'à la fin des années 1970 (pic des extractions). Le rythme annuel des extractions est plus soutenu que celui du Type 1. On enregistre pour le département de Loir et Cher une augmentation d'environ 0,6 millions de tonnes tous les dix ans et environ 1 million de tonnes pour le département du Loiret, la valeur maximal enregistrée dans le département de Loir et Cher est de 1,48 millions de tonnes et 2 millions de tonnes pour le Loiret en 1978. Ces valeurs diminuent d'environ 45 % en 1982 (suite aux accords conclus entre les élus et les

responsables des entreprises d'exploitations). La diminution des extractions s'est faite de façon progressive au cours de la période 1982 – 1992 (environ 0,05 à 0,1 millions de tonnes/an).

Les deux courbes (départements du Loiret et de Loir et Cher) ont évoluées de façon similaire au fil des années. Cependant, la quantité de sédiments extraits dans le département du Loiret est plus importante que celle du Loir et Cher, soit respectivement 32,16 et 22,53 millions de tonnes. Cela peut avoir des incidences différentes sur l'évolution morpho-sédimentaire du fond du chenal principal.

- **Type 3** : correspond à la courbe d'évolution des extractions effectuées dans le département de L'Indre et Loire. Ce dernier a connu une intense opération d'extractions de granulat sur une période d'environ 30 ans. On enregistre une oscillation de valeurs avoisinant 1 et 1,5 millions de tonnes depuis 1963 jusqu'à 1992 (il n'y a pas eu d'augmentation progressive des extractions). Ces valeurs chutent à 0,3 millions de tonnes en 1993 et à 0,2 millions de tonnes en 1995. Ce mode d'exploitation semble avoir plus d'influence sur l'évolution topographique du plancher alluvial en raison de la forte intensité et la durée des extractions (figure 79).

Le tonnage extrait dans le département d'Indre et Loire représente 37,51 millions de tonnes, soit 34 % de la quantité totale des extractions effectuées dans le lit mineur en Loire moyenne. On relève dans le département du Loiret une valeur totale d'environ 32,16 millions de tonnes soit 29 %. Les valeurs totales des extractions sont estimées à 22,53 millions de tonnes dans les départements du Loir et Cher et 17,52 millions de tonnes dans le département de Nièvre et Cher, soit respectivement 21 % et 16 % (figure 80).

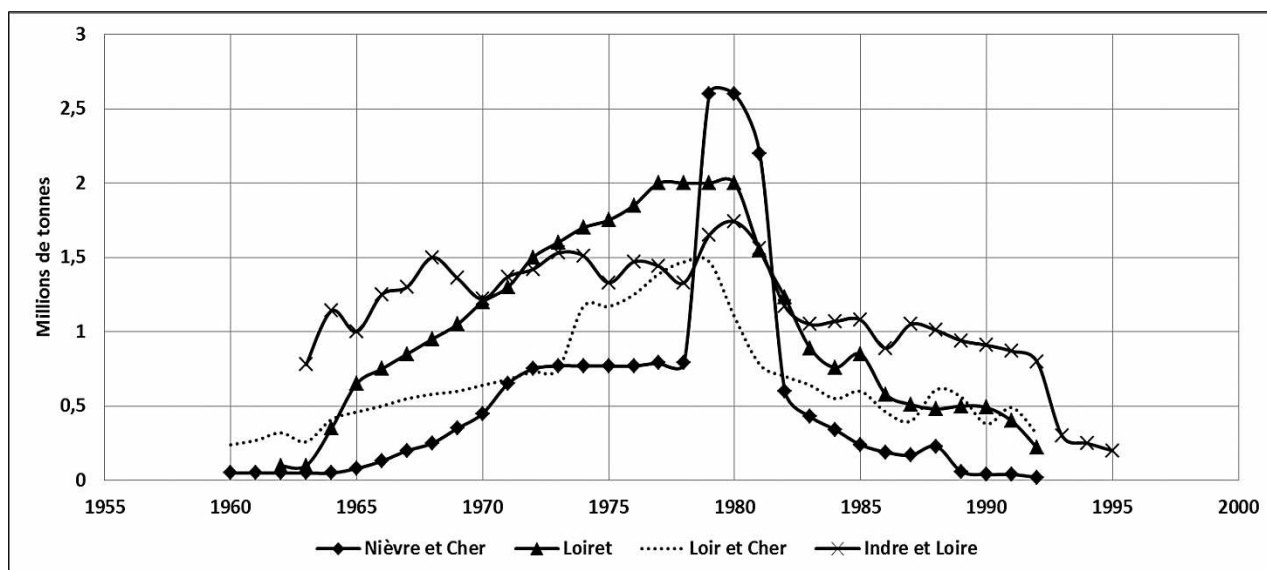


Figure 79. Évolution interannuelle des extractions de sédiments dans les départements en Loire moyenne. (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

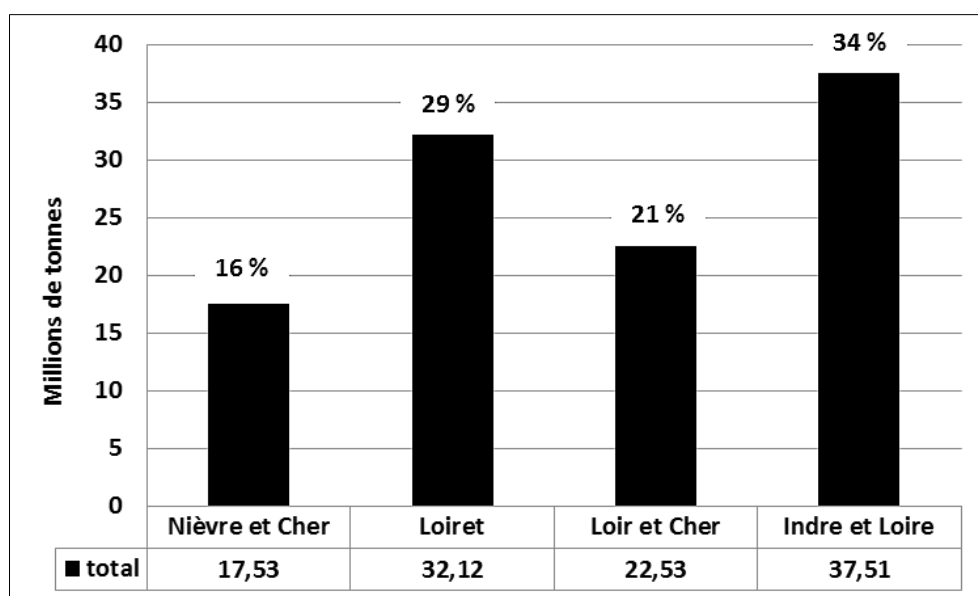


Figure 80. Répartition par départements des extractions de matériaux alluvionnaire effectués dans le lit mineur en Loire moyenne. (Source des données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

c. Evolution des extractions dans le lit mineur en basse Loire (1949 -1995)

L'extraction de matériaux dans la basse Loire concerne un linéaire de 138 km regroupant le département de Maine et Loire et le département de Loire Atlantique. En raison du manque de données détaillées nous n'avons pas pu présenter les résultats par département comme nous l'avons fait pour la Loire moyenne.

La courbe de l'évolution des extractions dans la basse Loire présente un mode similaire au mode d'extraction des départements du Loiret et de Loir et Cher (Type 2, figure 79). On relève une croissance des volumes de sédiments extraits entre 1950 et 1979, une baisse considérable entre 1979 et 1982 et une réduction progressive au cours de la période 1982-1993. La quantité de sable extrait dans le lit mineur est considérable, on enregistre une croissance de 2 millions de tonnes entre 1960 et 1970 et de 2,8 millions de tonnes entre 1970 et 1978. Cette augmentation rapide est due à la multiplication des sites d'extractions et à l'intensité de l'exploitation de granulat. Cela engendre des modifications rapides de la dynamique fluviale. D'après **Dambre et Malaval, 1993**, les conséquences de l'abaissement du lit de la Loire se sont fait sentir dans ce secteur plus tôt que dans la Loire moyenne (en raison de la forte densité des extractions).

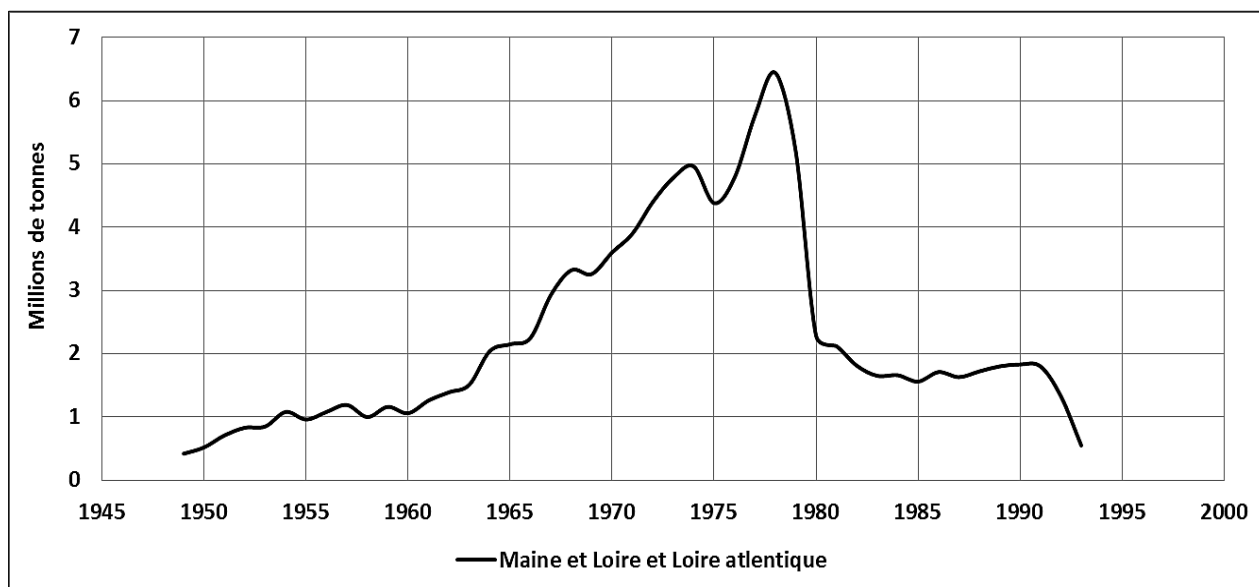


Figure 81. Évolution interannuelle des extractions de sédiments en basse Loire (département de Maine et Loire et Loire atlantique). (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

d. L'évolution interannuelle des extractions dans le lit mineur en aval du bec d'Allier (Loire moyenne et basse Loire)

Les extractions de matériaux sont effectuées dans la Loire moyenne et la basse Loire (Bec d'Allier et Nantes) sur une période de 35 ans (1960-1995).

On distingue une phase de croissance progressive des extractions s'étalant sur une période de 20 ans, la quantité de sable prélevé dans le lit passe de 1,9 millions de tonnes en 1960 à

12,9 millions de tonnes en 1979, soit un rythme de croissance annuelle d'environ 0,55 millions de tonnes.

Les extractions effectuées dans le but de construire les plates-formes des centrales nucléaires sont en partie responsables de la hausse des tonnages extraits entre 1979 et 1981. La seconde phase concerne la période 1979 – 1995, elle se caractérise par : une réduction importante du tonnage extrait dans le lit au cours de la période 1979 – 1982, on passe d'une valeur de 12,9 à 5,5 millions de tonnes, soit un rythme annuel de réduction de 2,46 millions de tonnes, cette forte réduction des volumes de sédiments extraits est due à l'application d'une politique visant la réductions des exploitations de granulat et dans une moindre mesure à l'arrêt des extractions utilisées pour la construction des centrales nucléaires. Le rythme annuel des extractions baisse progressivement à partir de 1982 jusqu'à l'arrêt définitif en 1995.

Ces deux phases (croissance ou régression) ont plus ou moins le même effet sur l'évolution morpho-sédimentaire du fleuve car elles contribuent à des degrés différents à l'altération de l'équilibre sédimentaire en favorisant les processus d'incision du chenal principal et par conséquent sa déconnexion des autres annexes d'écoulements (Bras secondaires, bras mort, mouille, boire). Il en résulte alors deux unités fonctionnelles au sein du lit mineur : la première est constituée de bras secondaires et îles, elle se caractérise par une sédimentation active. La seconde concerne le bras principal et se caractérise par une érosion active. Ce mode de fonctionnement rend difficile voire impossible (en raison de la différence topographique entre chenal principal et les bras secondaires, et la période de calme hydrologique actuelle) la migration latérale du chenal principal qui est un élément essentiel pour l'équilibre morphodynamique et sédimentaire du fleuve (figure 82).

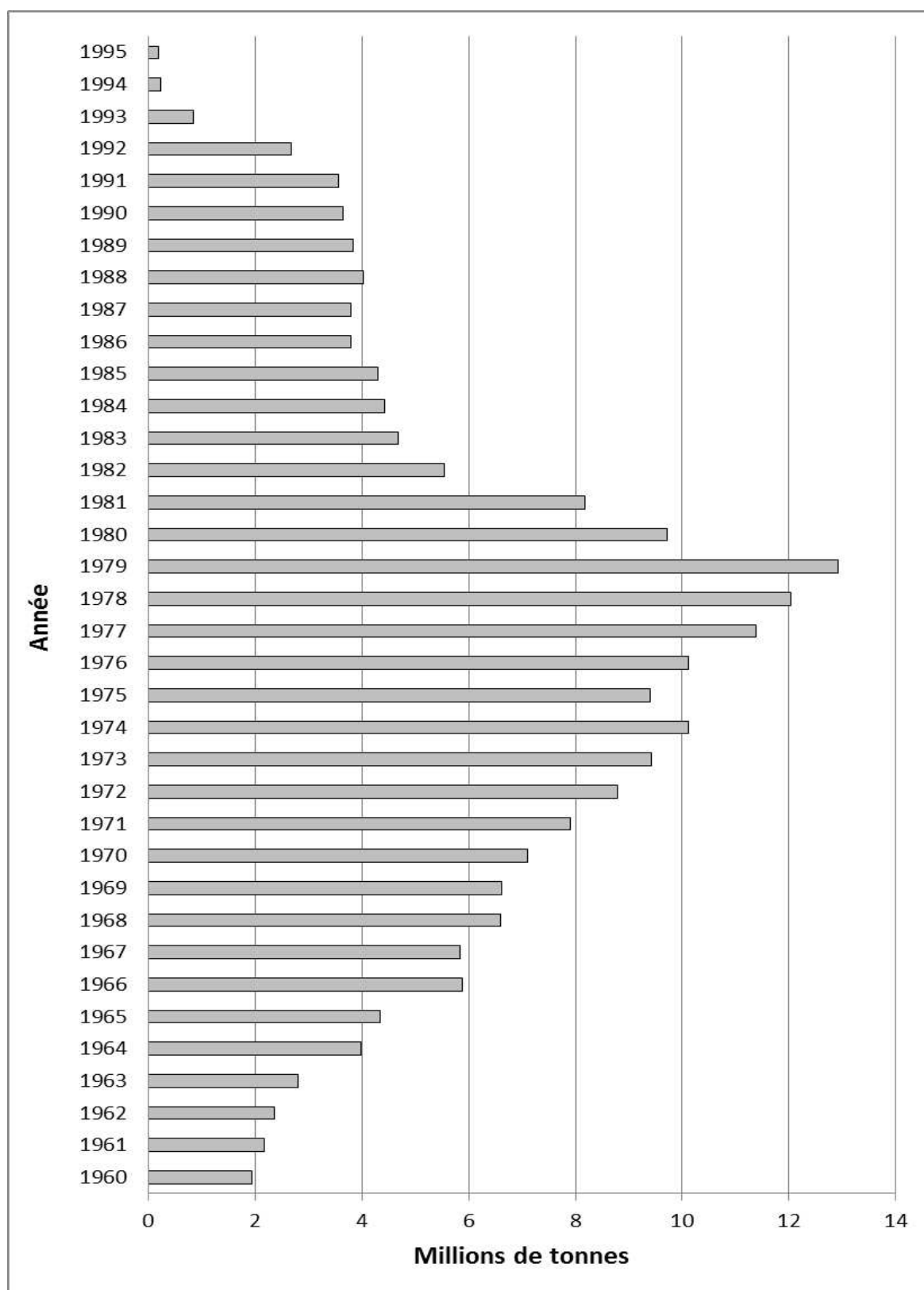


Figure 82. Évolution annuelle des extractions de matériaux dans le lit mineur de la Loire entre 1960 à 1994 (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

Ces valeurs concernent la Loire moyenne et la basse Loire.

La figure 83 représente une estimation globale des tonnages extraits dans le lit mineur de la Loire. Les extractions des matériaux effectuées en Loire amont concernent seulement la période 1981 – 1993 (en raison du manque de données). Les totaux des tonnages extraits en Loire moyenne et basse Loire concerne toute la période des extractions de granulats réalisées dans le lit mineur (1949 – 1995). La part des extractions de sédiments effectuées en amont du bec d'Allier représente seulement 2%, soit 3,9 millions de tonnes, cette valeur est surement sous-évalué en raison du manque de données. En ce qui concerne la partie moyenne et basse de la Loire, on enregistre respectivement 118,74 et 102,63 millions de tonnes, soit 53 % et 45 %.

Par ailleurs, il nous semble important de signaler la différence de longueur entre la partie moyenne (342 km) et la partie basse (138 km) du fleuve concernées par les extractions (soit environ 204 km). Les résultats de la figure 84 illustrent la densité des extractions totales dans le lit mineur en Loire moyenne et en basse de la Loire. Il en ressort du calcul du rapport «longueur du tronçon/nombre de sites d'extraction», sur ces deux portions du fleuve les résultats suivant : 4,92 km dans la basse Loire et 5,7 km dans la Loire moyenne, c'est-à-dire un site tous les 4,92 km en basse Loire et un site tous les 5,7 km en Loire moyenne. Il y a de ce fait plus de pression sur le stock sédimentaire en basse Loire : des quantités considérables de matériaux extraites en basse Loire 102,63 millions de tonnes, soit environ 1,34 millions de tonnes par kilomètre, alors que sur la Loire moyenne on enregistre 0,34 millions de tonnes par kilomètre. La densité moyenne des extractions par kilomètre en basse Loire est environ deux fois supérieure à celle de la Loire moyenne. L'impact sur l'évolution topographique du plancher alluvial est sûrement plus important en basse Loire.

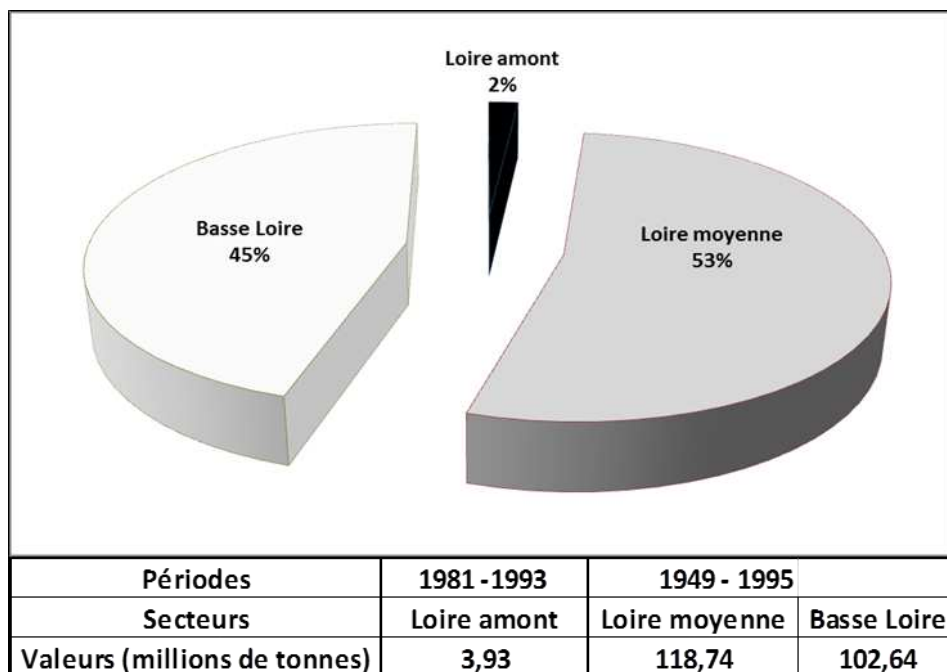


Figure 83. Valeurs totales des extractions effectuées dans le lit mineur de la haute, la moyenne et la basse Loire (Source des données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

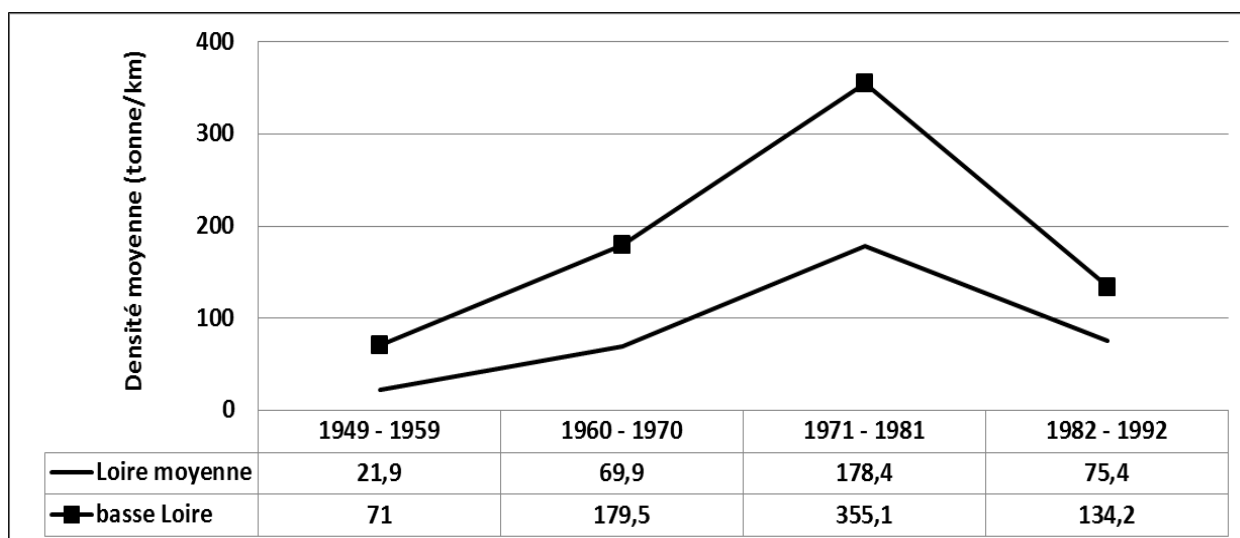


Figure 84 Évolution de la densité moyenne des extractions de granulat entre 1949 et 1992. (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).

Ces valeurs concernent les extractions effectuées dans le lit mineur en Loire moyenne et en basse Loire.

Les extractions de sédiments dans les lits fluviaux peuvent avoir des conséquences graves sur l'évolution morpho-sédimentaire des cours d'eau (Landon et Piegay 1994 ; Peiry et al., 1994 ; Landon 1996 ; Kondolf 1997). Le stock sédimentaire (fossile) disponible dans les

plaines alluviales et au sein du lit mineur, fait partie des éléments indispensables pour assurer l'équilibre sédimentaire des fleuves. L'extraction de granulat compte parmi les principaux facteurs de perturbations du budget sédimentaire des systèmes fluviaux.

Bravard (1994), qualifie cette exploitation comme cause principale du déclenchement d'un phénomène qui a atteint une «ampleur géologique» en une quarantaine d'années. Sur la Saône, Astrad et Dumont (2000) mettent en évidence la forte influence des extractions de matériaux alluvionnaires sur l'abaissement du plancher alluvial. Il apparaît d'après les études menées par Gautier (1994) sur le Buëch que les extractions de granulats sont le principal responsable de l'enfoncement du chenal. Sur la Loire, Gasowski (1994) met en évidence le phénomène d'incision du lit et son étroite relation avec les extractions massives de granulats. Cette étude concerne une période allant de 1900 à 1988. D'autres travaux réalisés dans le secteur du Bec d'Allier dans le cadre du PNRZH Loire, confirment la tendance d'abaissement du plancher alluvial (Gautier et al., 2001), le chenal principal a connu sur la période 1970 – 1995 un enfoncement de 2 à 3 m au niveau de l'île de Marzy. Le taux annuel d'enfoncement du lit varie de 3 à 8 cm dans ce secteur.

Nous allons tenter à partir de la méthode de comparaison des profils des lignes d'eau de mettre en relations le mode d'ajustement du profil en long du chenal principal et l'évolution spatio-temporelle des tonnages extraits dans le lit mineur en Loire moyenne. Le pas de temps de cette analyse est prolonger jusqu'à 2011.

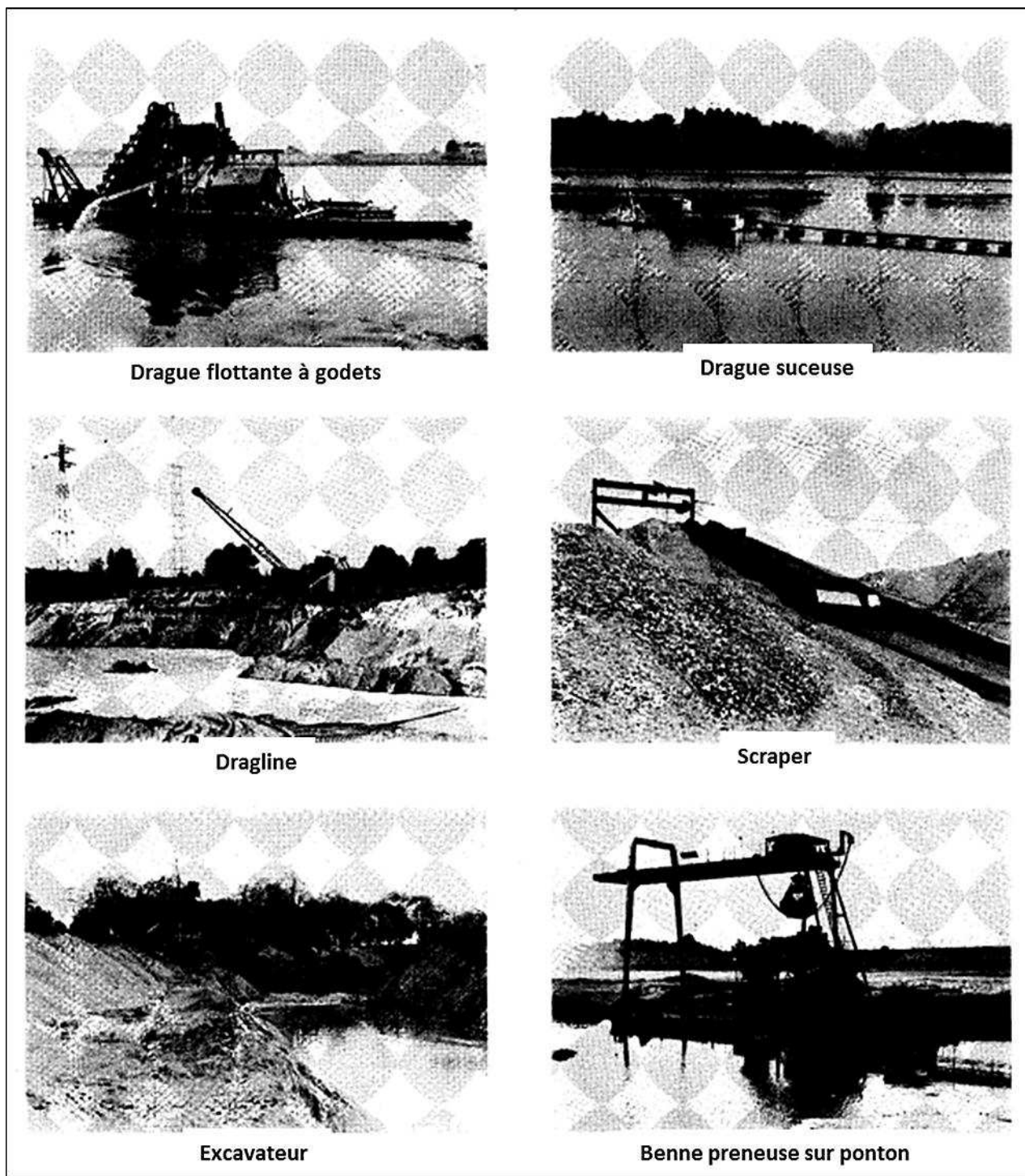


Figure 85. Les différents moyens d'extraction de granulats dans le lit de la Loire (source : Champion et al., 1971).

Ces moyens sont adaptés au régime irrégulier de la Loire. Ils sont souples et très mobiles. Cela facilite leur adaptation à la variation des niveaux d'eau et la disposition de du stock sédimentaire. On trouve : des dragues flottantes à godets, des dragues suceuses, des draglines, des scrapers, des excavateurs, des bennes preneuses sur ponton, des pelles et des chargeurs

2. Evolution des profils des lignes d'eau d'étiage : analyse et mise en relation avec le mode d'exploitation de granulat dans le lit mineur

L'analyse des profils des lignes d'eau est effectuée sur un linéaire allant de Cours-les-Barres à Saumur (en Loire moyenne), elle concerne deux périodes : de 1978 à 2005 et 2003 à 2011. Ces dates sont choisies en fonction des conditions hydrologiques, le profil le plus ancien dont nous disposons de valeur de débit date de 1978, nous avons retenu pour un débit similaire les profils réalisées en 1988 et 2005. Les données du profil réalisé en 2011 sont les plus récentes, elles sont confrontées aux données du profil de 2003 (débit similaire). Cette approche permet d'évaluer la variation verticale du plancher alluvial sur un pas de temps pluri-décennale (33 ans) et de mettre en évidence l'évolution morpho-sédimentaire du chenal principal au cours de la période d'exploitation de granulat et 16 années après l'arrêt de ces extractions.

Globalement, les profils des lignes d'eau présentent de grandes variations verticales (des secteurs d'abaissements et des rehaussements). On distingue d'après les résultats obtenus, **des phases d'ajustement local à court terme et une tendance d'abaissement générale du plancher alluvial.**

2.1 Evolution des profils des lignes d'eau sur la période 1978 - 2011

a. Evolution du profil en long entre 1978 et 1988

L'analyse des résultats tableau 14 montre une tendance d'évolution caractérisée par **une prédominance des secteurs concernés par l'abaissement de la ligne d'eau.** Ce tronçon représente 226,9 km, soit 65,1 % du linéaire étudié. La valeur moyenne de l'abaissement est de 13,03 cm, soit un rythme annuel de 1,3 cm.

Les secteurs de rehaussement de la ligne d'eau représentant seulement 25,7 Km, soit 7,37 % du linéaire étudié. Le taux moyen du rehaussement est de 19,87cm, soit un rythme annuel de 1,98 cm

On relève sur le profil, la présence de nombreux secteurs (inférieur à 15 km) caractérisés par une alternance de zone d'abaissement et de rehaussement de la ligne d'eau. Ces derniers représentent au total 95,9 Km soit 27,51 %. Ils se caractérisés par une rupture

bien marquée de la pente du profil en long. Cela reflète une modification topographique du plancher alluvial et une forte remobilisation de la charge solide (par érosion régressive).

On note par ailleurs, un important rehaussement au niveau du pont Wilson à Tours (1,15 m). Cet exhaussement peut être dû à la restauration du pont après son effondrement en 1978 (effet local).

On constate d'après ces résultats une tendance générale d'abaissement de la ligne d'eau. Les valeurs d'abaissement du profil suivent un gradient croissant de l'amont vers l'aval jusqu'à Tours.

Tableau 14. Évolution verticale du profil en long des lignes d'eau entre 1978 et 1988.

Période	secteur	Longueur	Évolution verticale du profil en long des lignes d'eau
1978 - 1988	Cours-les-Barres à Gien (du Pk 531 au Pk 436,2)	95 km	- valeur moyenne de l'abaissement : 3,66 cm, avec une valeur maximum de 23 cm enregistrée à Cours-les-Barres.
	Gien à Guilly (du Pk 436,2 au PK 405,2)	31 km	- valeur moyenne du rehaussement : 11 cm avec un maximum de 25 cm Saint-Père-sur-Loire (Pk 412,95) - valeur moyenne d'abaissement : 15 cm (Pk 420,4).
	Guilly à Meung-sur-Loire (du Pk 405,2 au Pk 346,4)	59 km	- valeur moyenne de l'abaissement : 13,5 cm avec un maximum de 34 cm enregistrée à Sandillon (Pk 377,3), - valeur moyenne du rehaussement : 23 cm à Orléans sur environ 10 km (Pk 364,4)
	Meung-sur-Loire à Tours (du Pk 346,4 au Pk 247,5)	99 km	- valeur moyenne du rehaussement : 44 cm sur 15 km (du Pk 346,4 au Pk 330,9), avec un maximum de 49 cm. - valeur moyenne de l'abaissement : 26,1 cm, sur un linéaire d'environ 83 Km. La valeur maximale est de 47 cm, enregistré à Chaumont-sur-Loire (PK 287,8).
	Tours à Saumur (du Pk 247,5 au Pk 182,6),	64 km	une alternance de zones de l'abaissement et du rehaussement de la ligne d'eau, ce tronçon s'étend de Tours à Saumur, soit environ 64 km (du Pk 247,5 au Pk 182,6), - valeur moyenne du rehaussement : 1,15 m au niveau du pont Wilson et 17 cm à Saumur (Pk 182,6). - valeur moyenne de l'abaissement : 7 cm à la Chapelle-sur-Loire (Pk 207,4).

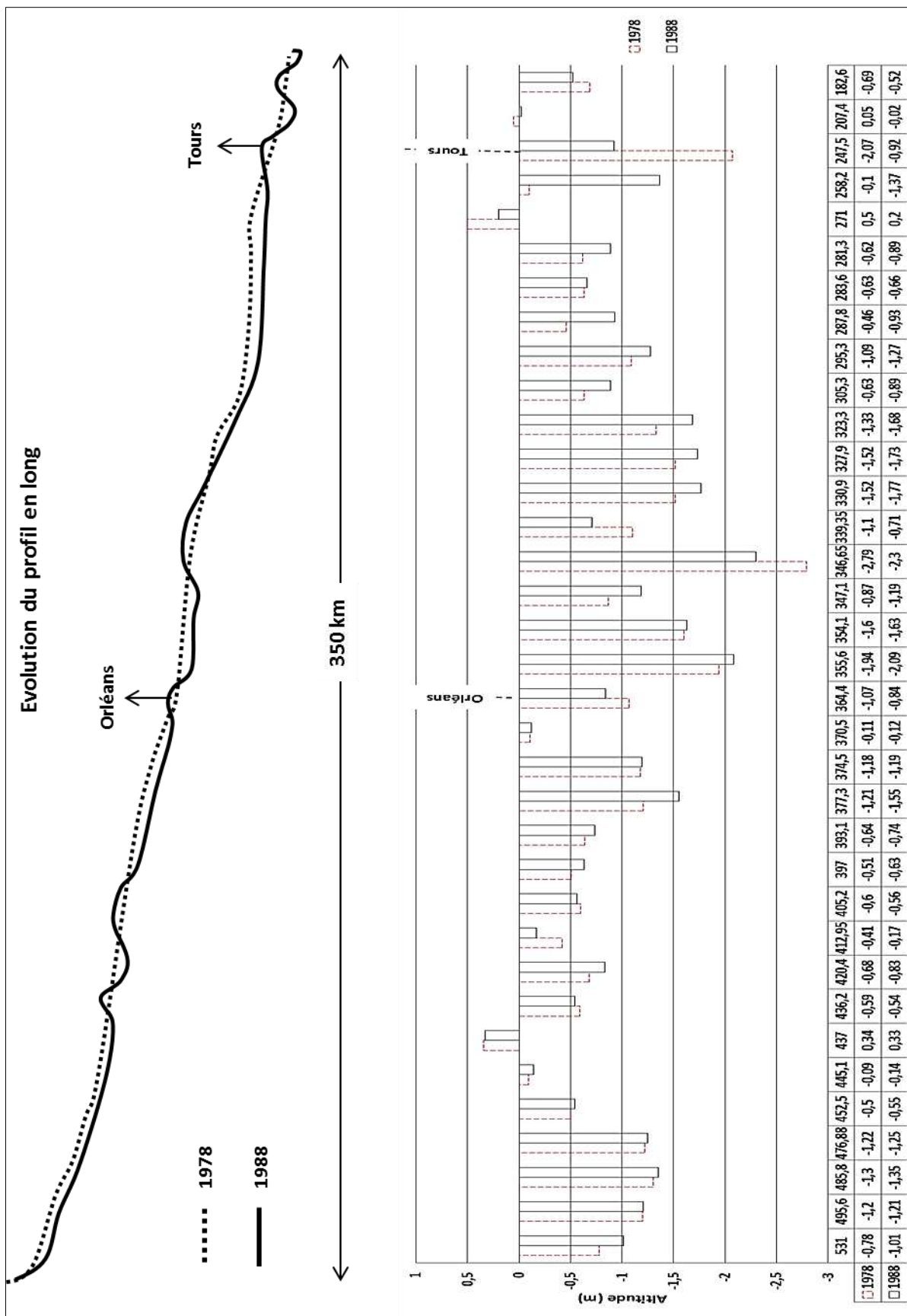


Figure 86. Évolution verticale du profil en long de la surface de l'eau entre Cours-les-Barres et Saumur pour la période 1978 – 1988 (source des données : DREAL Centre).

Evolution du profil en long entre 1978 et 2005

La comparaison des profils de la ligne d'eau de 1978 et 2005 renseigne sur l'évolution du fond du chenal principal à moyen terme, elle met en évidence les modalités d'ajustement du profil en long 10 années après l'arrêt des extractions de granulats.

Le résultat obtenu de la superposition de ces profils a permis d'apporter plus d'informations concernant l'évolution morpho-sédimentaire du plancher alluvial. On constate **une extension des secteurs concernés par l'abaissement de la ligne d'eau, un adoucissement de la pente du profil en long et une augmentation des valeurs moyennes d'abaissement**. Le linéaire concerné par l'abaissement est passé de 226,9 km (1988) à 318,3 km (2005), soit 91,2 % du tronçon étudié. Le taux moyen annuel d'abaissement est passé de 1,3 cm (1988) à 1,5 cm (2005). Le secteur de rehaussement est d'environ 31 km, soit 8,8 % et un rythme annuel moyen de 0,52 cm. On remarque par ailleurs, que les zones d'accumulations formées en 1988 en amont d'Orléans et à Tours ont été effacées probablement par une érosion progressive. **Ce constat confirme encore la tendance générale à l'abaissement du chenal principal de la Loire, les secteurs en exhaussement ne traduisant que des ajustements locaux. Cette évolution exprime clairement le contexte de déficit sédimentaire dans lequel évolue le fleuve.**

Tableau 15 Évolution verticale du profil en long des lignes d'eau entre 1978 et 2005.

Période	secteur	Longueur	Évolution verticale du profil en long des lignes d'eau
1978 - 2005	Cours-les-Barres à Combleux (PK 531, PK 370,5)	160,5 km	- valeur moyenne de l'abaissement : 14,26 cm avec un maximum de 46 cm enregistré à Sandillon (Pk 377,3)
	Combleux à Avaray (PK 370,5, PK 330,9)	39,6 km	<u>une alternance de zones de rehaussement et d'abaissement</u> - valeur moyenne de rehaussement : 14,5 cm : à la hauteur d'Orléans sur un linéaire de 14,9 km (du PK 370,5 au PK 355,6), avec un maximum de 20 cm à Combleux. - une seconde zone de rehaussement de la ligne d'eau d'une valeur moyenne de 14 cm étalée sur un tronçon de 15,7 km (du PK 346,6 au PK 330,9) - valeur moyenne de l'abaissement : 37,33 cm sur 9 km (du PK 355,6 au PK 346,6), avec un maximum de 58 cm à Meung-sur-Loire (PK 347,1).
	Avaray à Saumur (Pk 330,9, Pk 182,6)	148,3 Km	l'abaissement de la ligne d'eau prend le dessus jusqu'à Saumur. - valeur moyenne de l'abaissement : 68,83 cm avec un maximum de 1,61 m à Montlouis-sur-Loire (Pk 258,2).

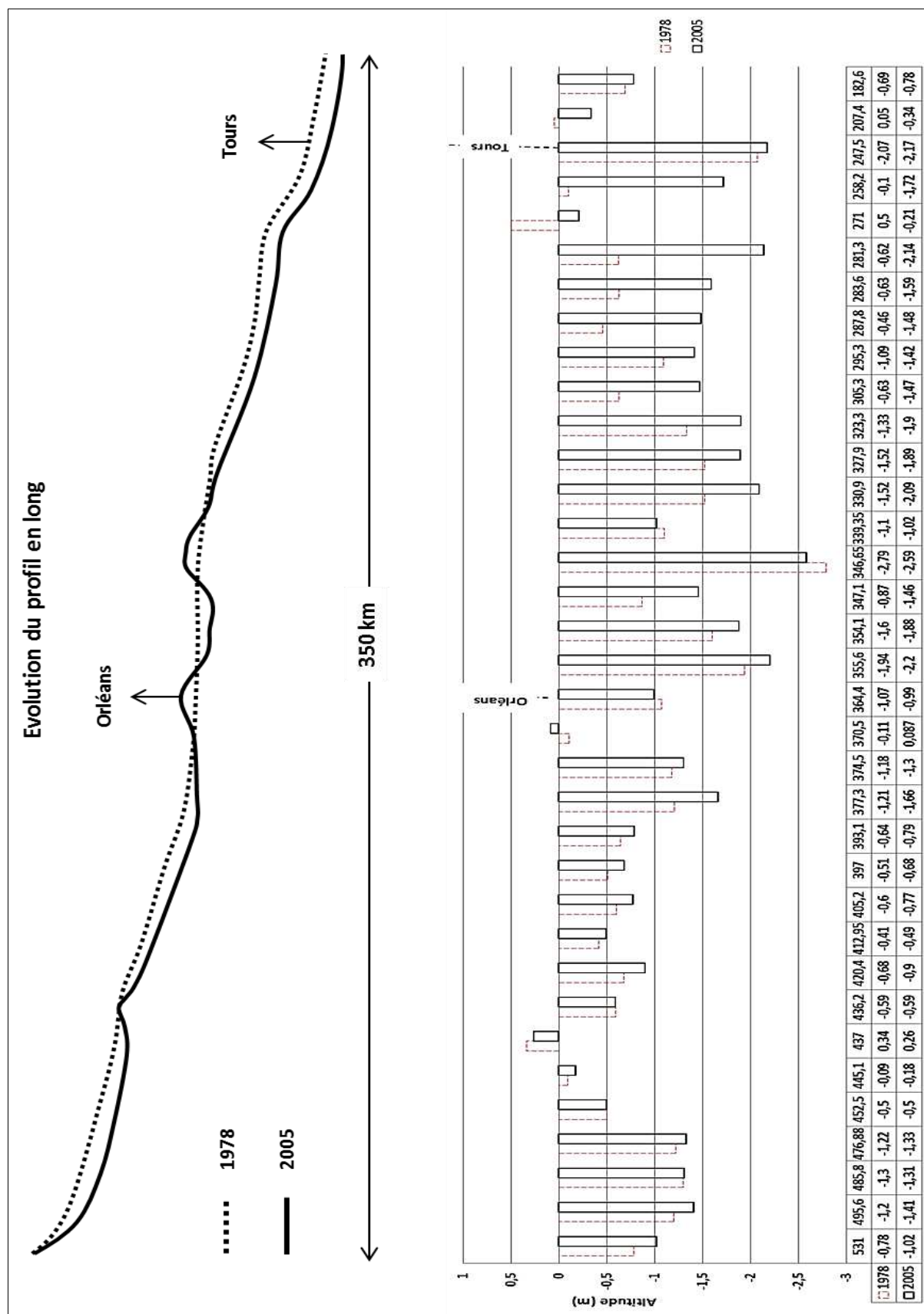


Figure 87. Évolution verticale de la ligne d'eau entre Cours-les-Barres et Saumur pour la période 1978 – 2005 (source de données : DREAL Centre).

Les résultats de la comparaison des profils des lignes d'eau effectuée pour la période 1978-2005 se résument en deux principaux modes d'évolutions :

- **une alternance de phases de rehaussement et d'incision** (de différentes intensités), ce mode d'évolution concerne les secteurs localisés entre Gien et Saint-Père-sur-Loire, entre Orléans et Avaray et en aval de Tours. Certains de ces secteurs ont connus une courte phase de rehaussement entre 1978 et 1988 (augmentation de la pente des biefs) et une seconde phase d'abaissement entre 1988 et 2005. Il en résulte de cette évolution un adoucissement de la pente et un déplacement des zones de sédimentation vers l'aval (en retrouve plus de zone de sédimentation en amont d'Orléans en 2005).

Ce mode d'évolution topographique doit être rapproché de l'ajustement du plancher alluvial suite à des extractions de granulat : cette opération déclenche une érosion régressive (par augmentation de la pente) à l'amont de la zone d'extraction et engendre des accumulations à l'aval de cette zone (dans la fosse d'extraction), ces dernières vont disparaître progressivement (par érosion progressive). Les processus de sédimentation et d'érosion s'estompent quand le cours d'eau a atteint un nouveau profil. Il en résulte de cet ajustement un abaissement général du fond du lit. Les tronçons concernés par ce mode d'ajustement se trouvent souvent dans les départements qui ont fait l'objet d'extractions massives de granulat (Loiret, l'Indre et Loire) (voir figure 90).

- **une incision permanente**, l'érosion progressive caractérise l'ensemble du tronçon. Elle engendre un « lissage » et un abaissement du fond du chenal (qu'on distingue clairement en 2005). Les pentes sont moins abruptes. L'abaissement de la ligne d'eau suit « un gradient croissant de l'amont vers l'aval », la valeur d'abaissement s'accroît au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'aval. Cette tendance liée aux extractions de granulat dont le tonnage des matériaux extraits augmente au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'aval. De ce fait, on constate l'influence des extractions de granulats sur l'évolution morpho-sédimentaire du lit de la Loire : **modification des processus d'ajustement du plancher alluvial et augmentation du déficit sédimentaire.**

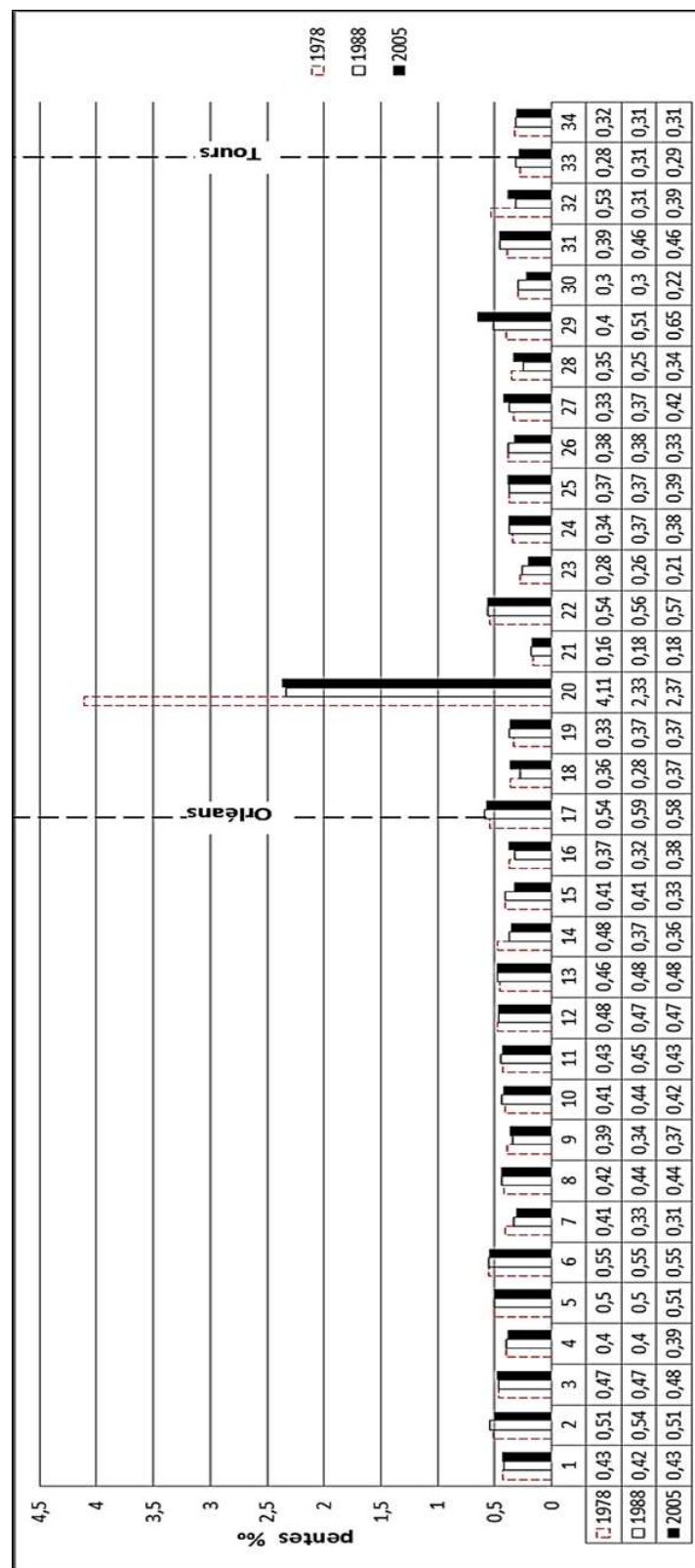


Figure 88. Évolution des pentes des biefs reliant les échelles de mesures sur le tronçon allant de Cours-les-Barres à Saumur (période 1978 – 2005).

Evolution des profils des lignes d'eau entre 2003 et 2011

On constate pour la période 2003 – 2011 la poursuite de l'enfoncement de la ligne d'eau mais à un rythme moins important. Le taux annuel moyen de l'abaissement passe de 1,5 cm en 2005 à 1,28 cm en 2011.

Le chenal principal de la Loire n'a pas encore atteint le stade de stabilisation. **L'arrêt des extractions semble réduire la vitesse d'incision du plancher alluvial mais il ne met pas fin à l'enfoncement du chenal principal.** Les secteurs concernés par l'abaissement de la ligne d'eau représentent en 2011, au total un linéaire de 244,6, soit 70 % du secteur étudié. Les zones de rehaussement de la ligne d'eau représentent 105,1 km soit 30 %. Le taux moyen annuel du rehaussement est de l'ordre de 0,65 cm (les valeurs moyennes de l'abaissement sont dans la majorité des cas supérieures à celles du rehaussement).

Ce constat confirme la tendance d'abaissement général de la ligne d'eau. Le croisement de ces résultats (pas de temps pluriannuel) avec ceux de la période 1978 – 2005 (analyse pluri-décennal), montrent que le chenal principal est passé à un autre stade d'ajustement. Ce dernier se caractérise par une disparition des secteurs d'alternance entre zones d'abaissement et de rehaussement c'est-à-dire les zones de rupture de pente (sur des distances inférieure à 15 km). Les zones de sédimentation sont relativement faibles (0,65 cm/an), ces secteurs d'accrétions sont probablement issus du remaniement du stock sédimentaire « sur place ».

Les processus d'érosion progressive engendrent le déplacement de la charge solide de l'amont vers l'aval. Le temps de stockage des ces sédiments dépend de l'intensité des processus d'érosion. L'accumulation des sédiments est donc momentanée, car elle ne résulte pas d'un surplus de matériel granulaire susceptible de pallier l'incision du lit, c'est plutôt un dépôt de sédiments en transition (vers l'aval) et un ajustement de la topographie en fonction des variables de contrôle (débit liquide et la charge solide). Ce mode d'ajustement favorise l'incision du plancher alluvial à l'échelle du tronçon étudié.

Tableau 16. Évolution verticale du profil en long des lignes d'eau entre 2003 et 2011.

Période	secteur	Longueur	Évolution verticale du profil en long des lignes d'eau
2003 - 2011	Cours-les-Barres à Cosne-sur-Loire (Pk 531, Pk 476,9)	54,1 Km	- valeur moyenne de l'abaissement : 24,33 cm, avec un maximum de 50 cm enregistré à Pouilly (Pk 495,6).
	Cosne-sur-Loire à Ousson-sur-Loire (Pk 476,9, Pk 452,5)	24 km	- valeur moyenne du rehaussement : 7 cm.
	Ousson-sur-Loire à Sigloy (Pk 452,5 à Pk 397)		- valeur moyenne de l'abaissement : 2 cm, avec un maximum de 4 cm enregistré à Saint-Père-sur-Loire et à Guilly (Pk 413 et 405,2 Pk)
	Sigloy à Châteauneuf-sur-Loire (Pk 397, Pk 393,1)	4 km	- valeur moyenne du rehaussement : 3 cm.
	Châteauneuf-sur-Loire à Combleux (Pk 393,1 à Pk 370,5)	22,6 km	- valeur moyenne de l'abaissement : 4,5 cm avec un maximum de 7cm enregistré à Checy.
	Combleux à Orléans (Pk 370,5, Pk 364,4)	6 km	- valeur moyenne du rehaussement : 9 cm.
	Orléans à Saumur (du Pk 364,4, Pk 182,6)	181,8 km	- <u>valeur moyenne de rehaussement</u> : 2 cm à Mareau (Pk 355,6), sur un linéaire d'environ 1,5 km, 8 cm entre Meung-sur-Loire "Pont Aval" et Chaumont-sur-Loire (Pk 346,7 à Pk 287,8), avec un maximum de 19 cm mesuré à Blois (Pk 305,3), 4 cm à Montlouis-sur-Loire (PK 258,2), sur un linéaire d'environ 10,7 km. - <u>valeur moyenne de l'abaissement</u> : 10,5 cm entre Mareau et Meung-sur-Loire (Pk 355,6 à Pk 346,7), soit un linéaire de 8,9 km, avec une valeur maximale de 11 cm à Meung-sur-Loire 11,75 cm entre Chaumont-sur-Loire et Montlouis-sur-Loire (Pk 287,8 à Pk 258,2) sur un linéaire de 29,6 km, avec une valeur maximale de 16 cm à Chaumont-sur-Loire , 8,5 cm sur 64,9 km entre Tours et Saumur (Pk 247,5 à Pk 182,6). avec une valeur maximale de 12 cm à la Chapelle-sur-Loire (Pk 207,4).

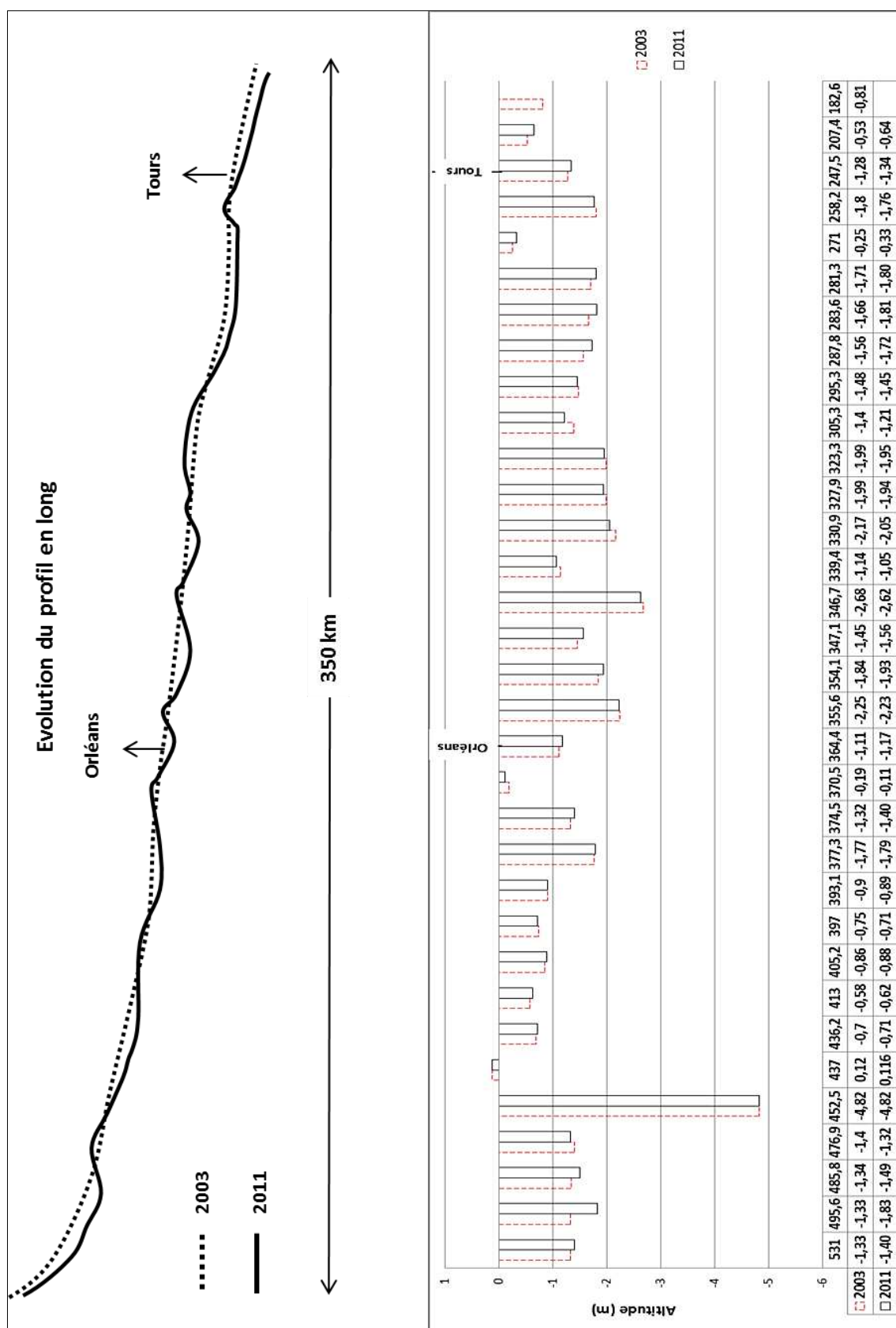


Figure 89. Évolution verticale des lignes d'eau entre Cours-les-Barres et Saumur pour la période 2003 – 2011 (source des données : DREAL Centre).

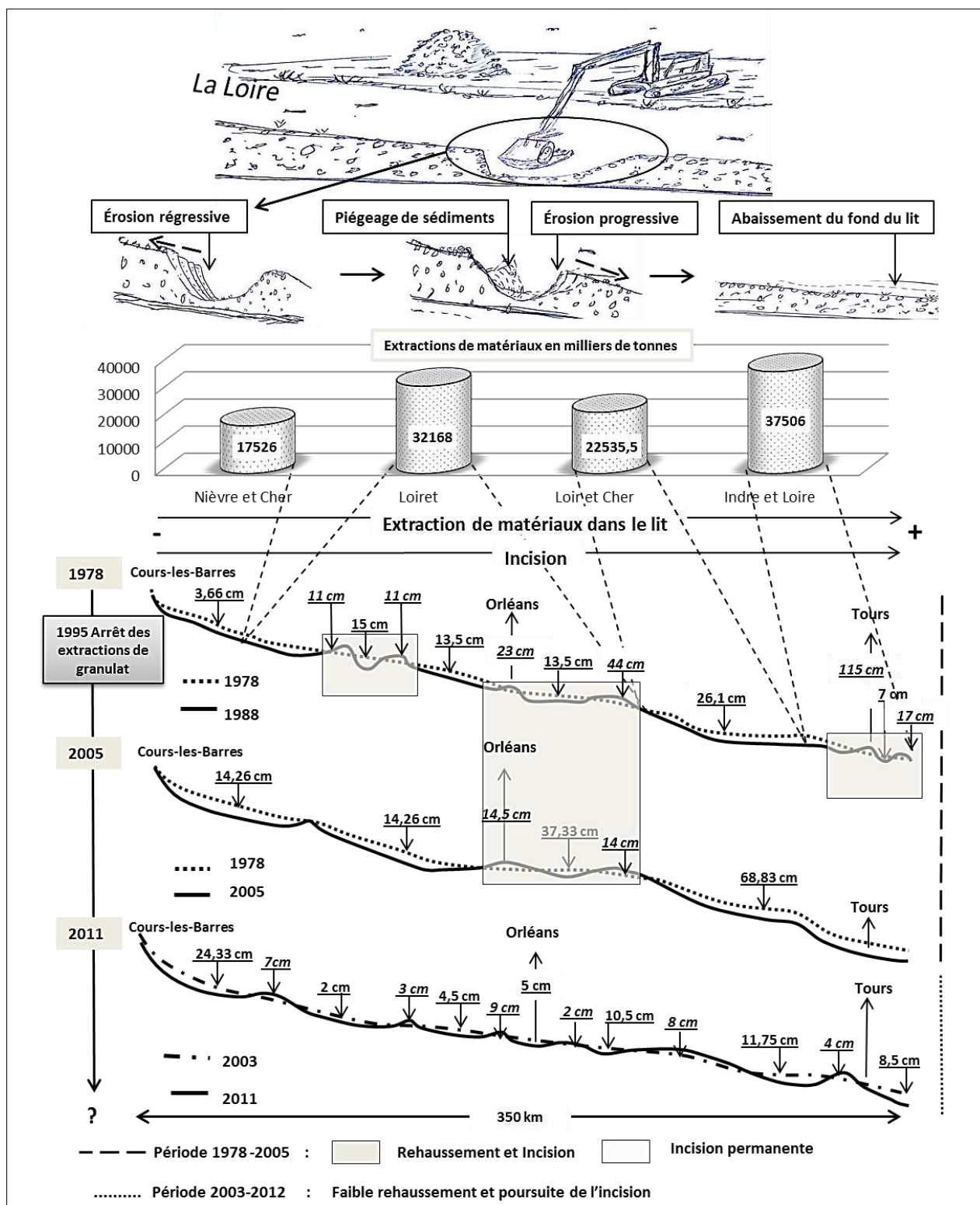


Figure 90. Mise en relation de l'évolution des extractions de granulat et du mode d'ajustement du fond du chenal principal de la Loire entre Cours-les-Barres et Saumur.

Les secteurs à rupture brutale de pente correspondent aux secteurs qui ont connus une forte exploitation du matériel alluvionnaire.

Conclusion

L'exploitation du matériel granulaire dans le lit de la Loire est de loin la plus importante à l'échelle du bassin versant, elle représente 93,9 % des sédiments extraits dans les lits mineurs et 44,86 % des sédiments extraits dans les lits majeurs dans cours d'eau du bassin versant. Environ 225 millions de tonnes de sédiment ont été extraits dans le lit mineur entre 1949 et 1995, soit un rythme annuel d'environ 4,9 millions de tonne par an. Cette valeur dépasse largement le 1 millions de tonne de sédiment transporté par la Loire (estimer par **Babonaux, 1970**). Il en résulte sans doute de cette forte exploitation une aggravation du déficit sédimentaire au sein du lit la Loire. Ces extractions sont considérés comme un facteur aggravant le phénomène d'abaissement du plancher alluvial (**Gasowski 1994 ; Grivel 2008**). Elles ont un impact direct sur le lit, mais aussi des conséquences indirectes sur la plaine alluviale : abaissement de la nappe, assèchement des zones humides et peuvent également compromettre la stabilité des ouvrages d'art.

Les résultat de l'analyse des profils des lignes d'eau réalisée à un pas de temps pluriannuel et pluri-décennal (ajustement des méso-formes) nous a permis de distinguer les différentes phases de l'ajustement du profil en long du chenal principal et de déduire la tendance de l'évolution verticale du plancher alluvial sur la période d'étude (33 ans). Disposant d'un profil en long réalisé en 1988, soit 9 ans après le pic des extractions enregistré en 1979 et de deux profils réalisés en 2005 et 2011, soit respectivement 10 et 16 ans après l'arrêt des extractions en 1995, nous avons pu mettre en évidence l'influence des extractions de granulat sur l'évolution verticale du plancher alluvial.

On constate d'après ces résultats une poursuite de l'incision du plancher alluvial en 2011, le rythme de cet abaissement est plus faible que le rythme enregistré sur la période 1978 - 2005. L'exploitation du matériel granulat dans le lit mineur favorise l'accélération du rythme d'incision du chenal principal. L'arrêt des extractions de sédiments dans le lit mineur (mis en application en 1995) **est indispensable pour préserver le stock sédimentaire mais ne mais pas fin à l'incision du chenal principal pour l'instant.**

Il est important de rappeler que les extractions de granulat ne sont pas les seules responsables de l'abaissement du lit de la Loire. Le phénomène de « chenalisation »

soutenu par les ouvrages de navigation (épis, chevette et digue), favorise l'incision du lit à travers la concentration des eaux dans le bras principal. La création d'un chenal navigable sur la Loire Moyenne vers le milieu du 19^{ème} siècle et sur la Basse Loire au début du 20^{ème} siècle, a contribué de façon considérable à l'abaissement du niveau des basses eaux. A Orléans par exemple, la construction de "dhuit" ou digue longitudinale, a provoqué un abaissement de la ligne d'eau d'étiage de 84 cm pour la période allant de 1847 et 1868 (Gasowski, 1994), soit un rythme de 4 cm par an.

Sur le secteur de la Réserve Naturelle du Val de Loire, Grivel (2008), met en évidence une phase d'enfoncement notée entre 1930 et 1970 (en moyenne 1,5 à 2 m). D'après cet auteur, l'incision du plancher alluvial correspond à une période caractérisée par une accélération de l'abandon de la bande active et du rythme de formation des îles.

L'incision du lit de la Loire est antérieure à la période des extractions de granulats. Les prélèvements du matériel granulaire effectués dans le lit mineur ont aggravé l'équilibre morpho-sédimentaire du lit de la Loire déjà affecté, au début du 20^{ème} siècle, d'une incision. Cette incision pourrait être liée à la construction des levées (18^{ème}-19^{ème}) et des chevrettes.

Nous abordons dans le chapitre suivant l'évolution des formes en plans et du couvert végétal au sein de nos sites ateliers. Nous allons tenter de mettre évidence l'influence des événements hydrologiques, des aménagements fluviaux et des extractions de granulat sur l'évolution spatial des unités fluvial (bras principal, chenaux secondaires îles...).

Deuxième Partie

Deuxième Partie

Chapitre 4. Evolution morphodynamique, impact du forçage anthropique et effets des travaux d'entretien

Le présent chapitre est consacré à une analyse morphodynamique menée à échelle fine. Nos trois sites ateliers sont les champs d'applications de cette approche. On aborde dans un premiers temps l'analyse de l'évolution des formes en plan dans le but de déterminer les seuils temporels de changement du style fluvial et de fournir des données quantitatives relatives à l'évolution de ces formes fluviales. Cela nous amène à l'analyse de l'évolution spatiale de la bande active et du couvert végétal. Le second objectif est la mise en relation du mode d'ajustement des unités fluviales (chenal principal, îles, franc-bord et bras secondaires) avec les différentes actions anthropiques exercées sur l'espace fluvial (aménagement, restauration du lit et extractions du granulat) et les fluctuations des conditions hydrologiques.

1. L'évolution des formes en plan dans les sites ateliers (1850 – 2005)

La métamorphose du lit de la Loire, analyse des modalités du changement du style fluvial, évolution spatiale des mésoformes et mise en relation de la dynamique fluviale avec le forçage anthropique.

L'analyse de l'évolution des formes en plan est réalisée sur un pas de temps de 155 ans. Elle met en évidence une profonde métamorphose du lit de la Loire qui se traduit par : un changement du style fluvial et la rétraction de la bande active au profit des formes végétalisées (îles et franc-bord). Cette métamorphose fluviale est mise en relation avec le degré d'aménagement de l'espace fluvial (présence d'ouvrage de navigation, levées) et l'exploitation du matériel granulaire dans le lit mineur. Nous tentons de mettre en lumière l'influence des aménagements fluviaux et l'exploitation de granulat sur l'évolution spatiale des formes fluviales. Les actions de restauration et d'entretien du lit sont également prises en compte dans cette analyse.

Nous avons constaté d'après résultats de l'analyse de l'évolution spatiale des formes en plan au sein des trois sites ateliers (La Charité-sur-Loire, de Mesves et de Guilly) une diminution (à des degrés différents) de la surface de la bande active au profit des formes végétalisées (îles et franc-bord). Cela est en grande partie lié aux durées de submersion des bancs et des bras secondaire susceptible d'être coloniser par la végétation. Le débit à pleins varie d'un site à l'autre. Ce débit est proche des débits morphogènes susceptibles de façonner les formes fluvial au sein du lit mineur.

D'autres facteurs ont favorisé à différents degrés l'extension de la bande végétalisée au sein des trois sites :

- l'incision du plancher alluvial et par conséquent l'abaissement de la ligne d'eau et la réduction des durées de submersion des bras secondaires et des îles. Le phénomène d'incision est aggravé par les extractions massives de granulat effectué dans le lit mineur entre 1949 et 1995. Cela concerne les trois sites ateliers.
- une tendance à la sédimentation au sein des bras secondaire, îles et franc-bord. La sédimentation est soutenue par la végétation dans le site de Mesves et par la végétation et les ouvrages fluviaux dans les sites de La Charité et Guilly.

- l'influence des ouvrages fluviaux (chevrette et seuil durs) sur la vitesse et l'orientation des flux solide et liquide au sein du lit mineur. Les accumulations sédimentaires sont souvent formées en aval de ses ouvrages fluviaux. Cela concerne les sites de La Charité-sur-Loire et Guilly.

- l'arrêt de l'entretien du lit les mutations des activités agropastorales et l'assouplissement hydrologique sont aussi des facteurs favorisant l'extension du couvert végétal au sein des sites atelier.

Par ailleurs, les travaux de restauration (dévégétalisation) réalisés dans le lit mineur semble être efficace mais pas suffisants pour inverser la tendance de rétraction de la bande active.

L'incision du plancher alluvial favorise l'extension spatiale de la bande végétalisée

L'extension du couvert végétal au sein du lit mineur est constatée à l'échelle de la Loire moyenne. L'étude réalisée par Braud et Latapie (2012) sur un tronçon de la Loire allant du Bec d'Allier au Bec de Maine met en évidence une nette augmentation de la végétation ligneuse au sein du lit mineur du bec d'Allier jusqu'au bec de Vienne et une stabilisation de la situation en aval de la Vienne. L'élargissement de la bande occupée par la végétation ligneuse est en moyenne de 25 mètres sur la zone étudiée avec des élargissements ponctuels de parfois 180 mètres. Nous avons mis en relation les résultats de cette étude avec ceux de l'évolution des profils des lignes d'eau que nous avons réalisées entre 1978 et 2005. Il apparaît d'après le croisement des données de ces deux approches (les lignes d'eau et évolution de la bande végétalisée) à l'échelle de la Loire moyenne, que les secteurs ayant connus une forte extension du couvert végétal correspondent aux zones d'abaissement important de la ligne d'eau (incision), on cite à titre d'exemple le tronçon Bec d'Allier - Cosne (60 km), où on relève un élargissement moyen de la bande végétalisée de l'ordre 100 m (1995 - 2010) et une incision moyenne d'environ 15 cm (1978 – 2005). Ces résultats mettent en évidence l'influence de l'incision du plancher alluvial sur l'évolution et la pérennité des espaces végétalisés (figure 91).

L'incision du plancher alluvial engendre une transformation de la géomorphologie du cours d'eau. Cette métamorphose remet en cause l'organisation spatiale des habitats

(Bravard et al 1989, Church 1992). Les conséquences de ce changement peuvent être néfastes sur les faunes locales.

Après ce bref aperçu des principaux traits qui caractérise l'évolution des formes en plan, nous proposons une analyse détaillée site par site.

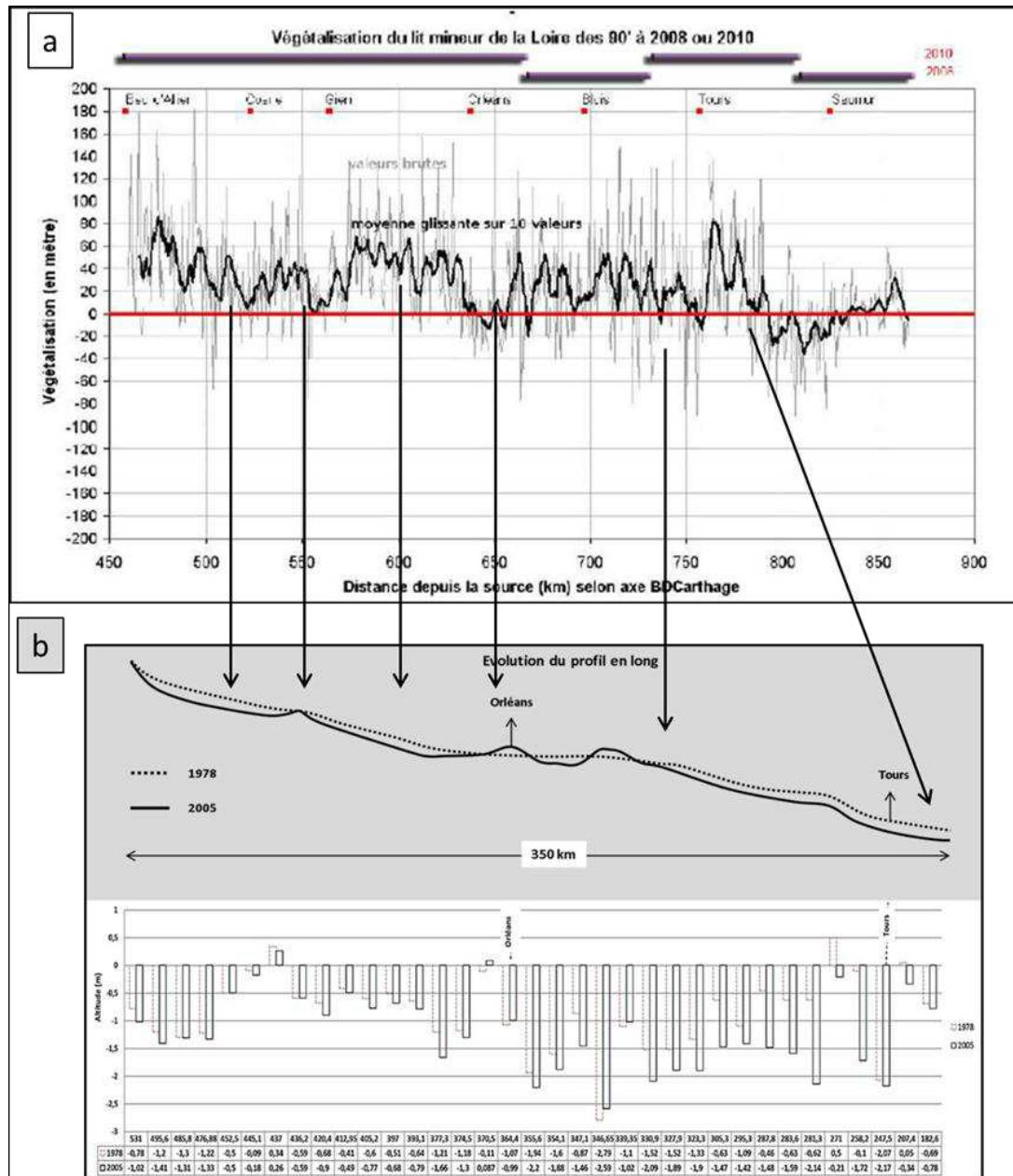


Figure 91. Rapprochement des résultats de l'évolution de la largeur de la bande végétalisée (a) et l'évolution verticale des profils de la ligne d'eau (b), (1978 – 2005).

Les secteurs concernés par une forte incision ont aussi connus une importante extension du couvert végétal (graphique (a) réalisé par Braud et Latapie, 2012).

1.1 Site atelier de la Charité-sur-Loire

1.1.1 Évolution du style fluvial et impact du forçage anthropique

L'analyse diachronique de l'évolution des formes en plan met en évidence deux périodes au cours desquelles le lit de la Loire change de forme (1850 – 1957 et 1957 – 2002). En 1850 la Loire développait un style fluvial à chenal large qui occupait tout son lit. Les premières formes stabilisées (îles) sont apparues à la fin des années 1950 (entre 1957 et 1969). Ces formes insulaires se développent essentiellement en rive gauche dans la moitié amont du secteur d'étude et dans une moindre mesure en rive droite dans la moitié aval du lit. La répartition spatiale des îles laisse penser à l'existence de zones préférentielles de sédimentation au sein du lit mineur. Pour une durée d'environ 107 ans, la Loire passa du style à chenal unique à un style fluvial à chenaux multiples. Ces derniers sont d'une largeur similaire, soit en moyenne 80 m.

Le second changement se produit sur une période plus courte, des années 1957 à 2002. On constate alors une individualisation du bras principal et un rétrécissement des chenaux secondaires, voire leur disparition dans certain cas. On passe en l'espace d'environ 45 ans à un nouveau style fluvial avec un changement de la géométrie des formes fluviales : chenal principal bien distinct, des bras secondaires étroits et des îles de plus en plus grandes et bien développées (apparition du phénomène de chenalisation).

On remarque par ailleurs, que le premier changement de la géométrie des formes fluviales (passage du chenal large au style à chenaux multiples) s'est produit sur un pas de temps beaucoup plus long que le second changement (vers la chenalisation), soit un écart de 62 ans. **L'ajustement des formes du lit de la Loire s'est donc produit à deux rythmes.** Cette métamorphose du paysage fluvial est due à des modifications (à des degrés différents) des variables de contrôle de l'hydrosystème fluvial qui sont liées dans la majorité des cas à des actions anthropiques : la période 1850 – 1957 correspond à une période postérieure à l'édification d'ouvrages pour l'amélioration des conditions de la navigation tel est le cas de la chevette de la Charité-sur-Loire conçu en 1938. D'un point de vue hydro-sédimentaire, la présence de cet ouvrage en rive gauche (à l'entrée du bras de la rive gauche) favorise la concentration des eaux en rive droite et réduit la compétence du cours d'eau en rive

gauche. Cela favorise aussi la formation de dépôts de sédiments en arrière de cet ouvrage en rive gauche (et la formation d'îles).

L'analyse de la carte de 1760 (ci-dessous) met en évidence dans le même secteur un autre exemple de l'influence des aménagements fluviaux sur les processus de sédimentation au sein du lit mineur. On constate d'après ce document la présence de zones de sédimentations en rive gauche (dans site de la Charité-sur-Loire). Ces zones d'accumulation se trouvent en aval des ouvrages fluviaux (épis de pêcheurie). On distingue clairement sur cette carte les ouvrages et les dépôts sédimentaires en rive gauche. Ce secteur a donc fait l'objet d'aménagements (entravant la circulation du flux liquide et solide) depuis le 18^{ème} siècle, c'est-à-dire bien avant l'édification de la chevrette.

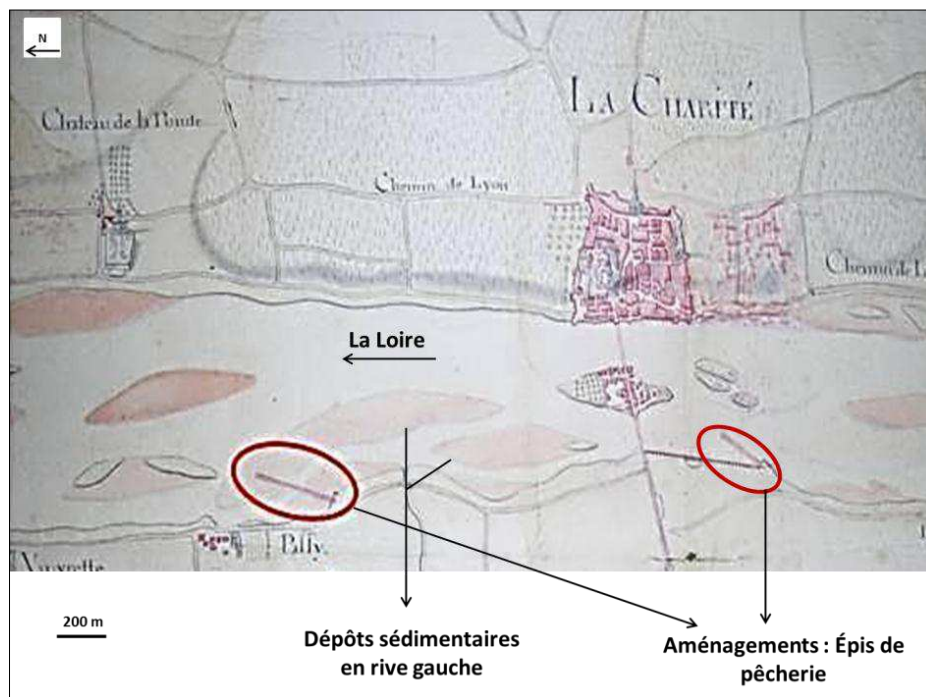


Figure 92. Cartes du site de la Charité-sur-Loire en 1760.

On note la présence d'ouvrage (épis de pêcheurie) et des dépôts de sédiments en rive gauche. (Source : Cartes et Plans, XVIII^e siècle, A.N CP/F/1410066/4/5/H).

La seconde période de métamorphose des formes fluviales (1957 – 2002) correspond à la période de bouleversements multiples : la croissance de la végétation alluviale liée à la fois à l'arrêt de la navigation (fin 19^{ème}) et à l'abandon des pratiques agro-pastorales (seconde moitié du 20^{ème} siècle) (Gautier et al., 2007 ; Grivel, 2008). De plus, les extractions massives de granulat dans le lit mineur de la Loire ont accéléré le rythme d'incision du plancher

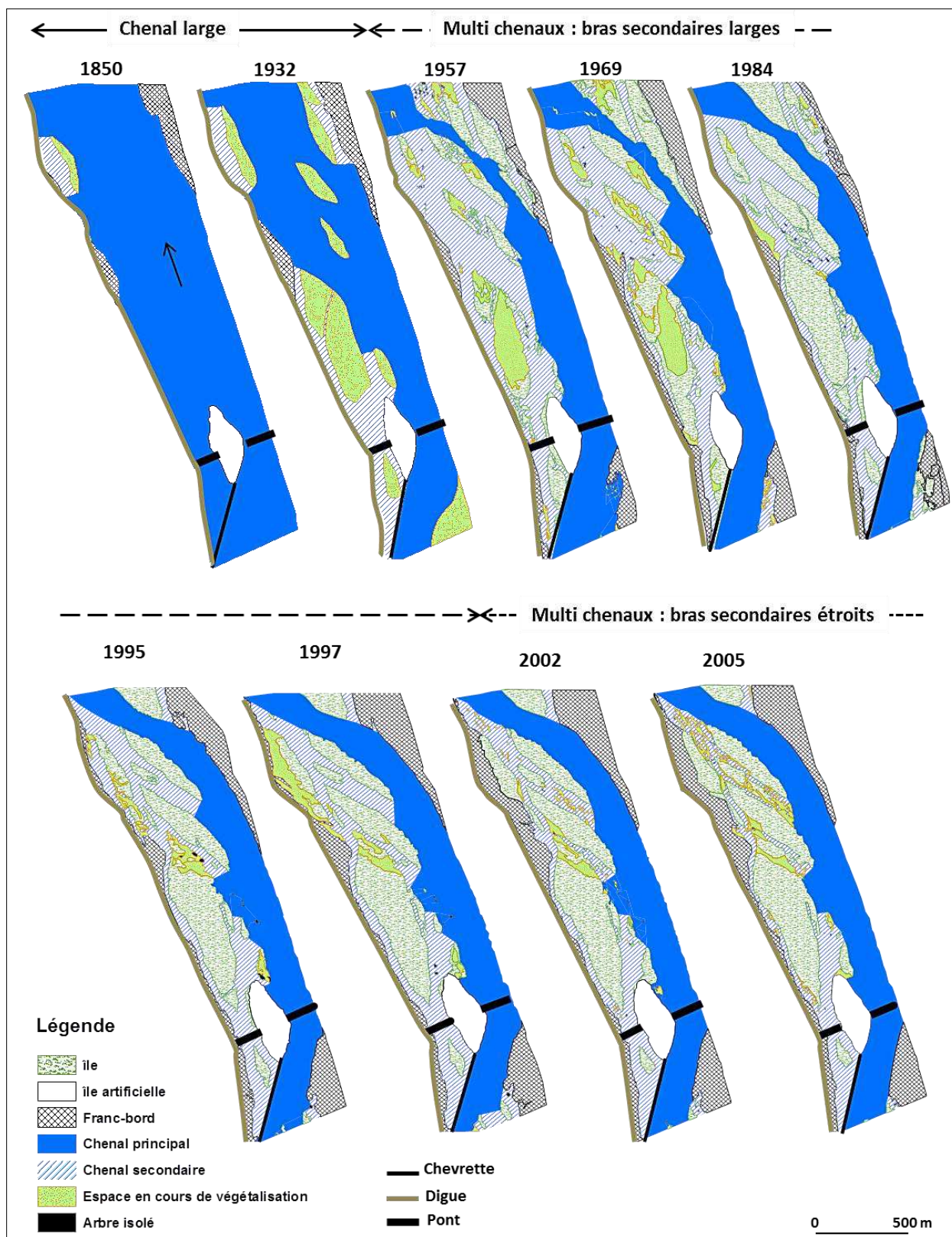


Figure 94. Site atelier de la Charité-sur-Loire : évolution des formes en plan et mise en évidence des périodes de changement de style fluvial.

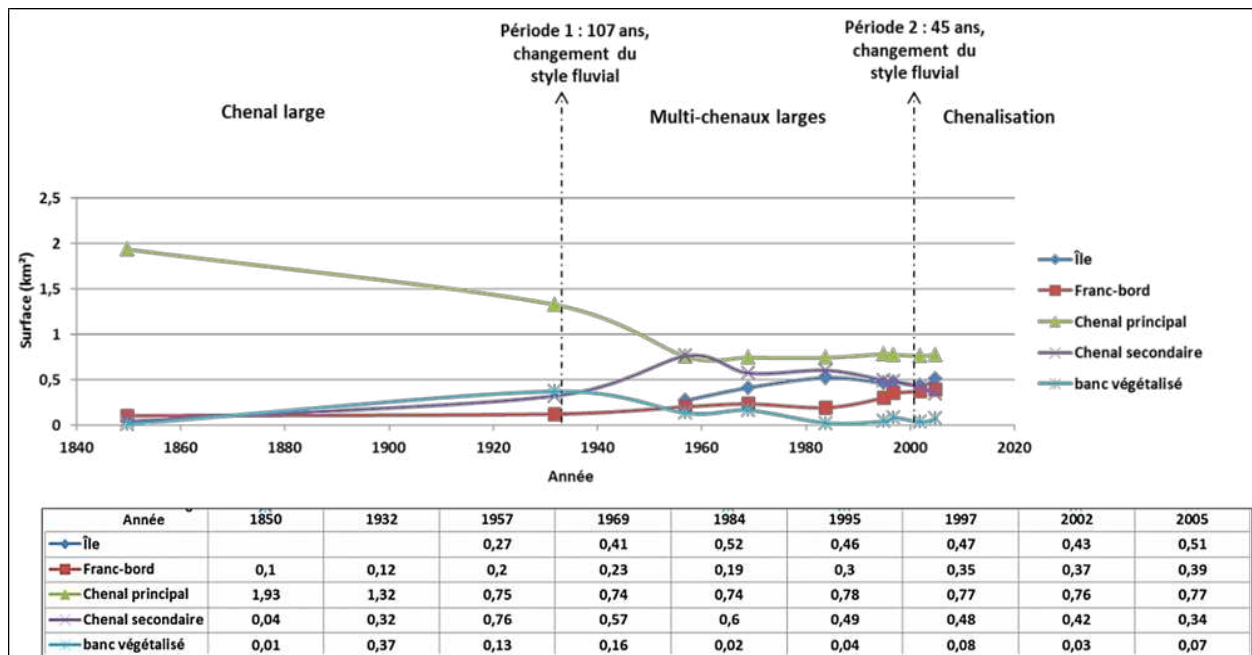


Figure 95. Évolution des surfaces des formes fluviales dans le lit mineur et détermination des pas de temps relatifs au changement du style fluvial (site de La Charité-sur-Loire).

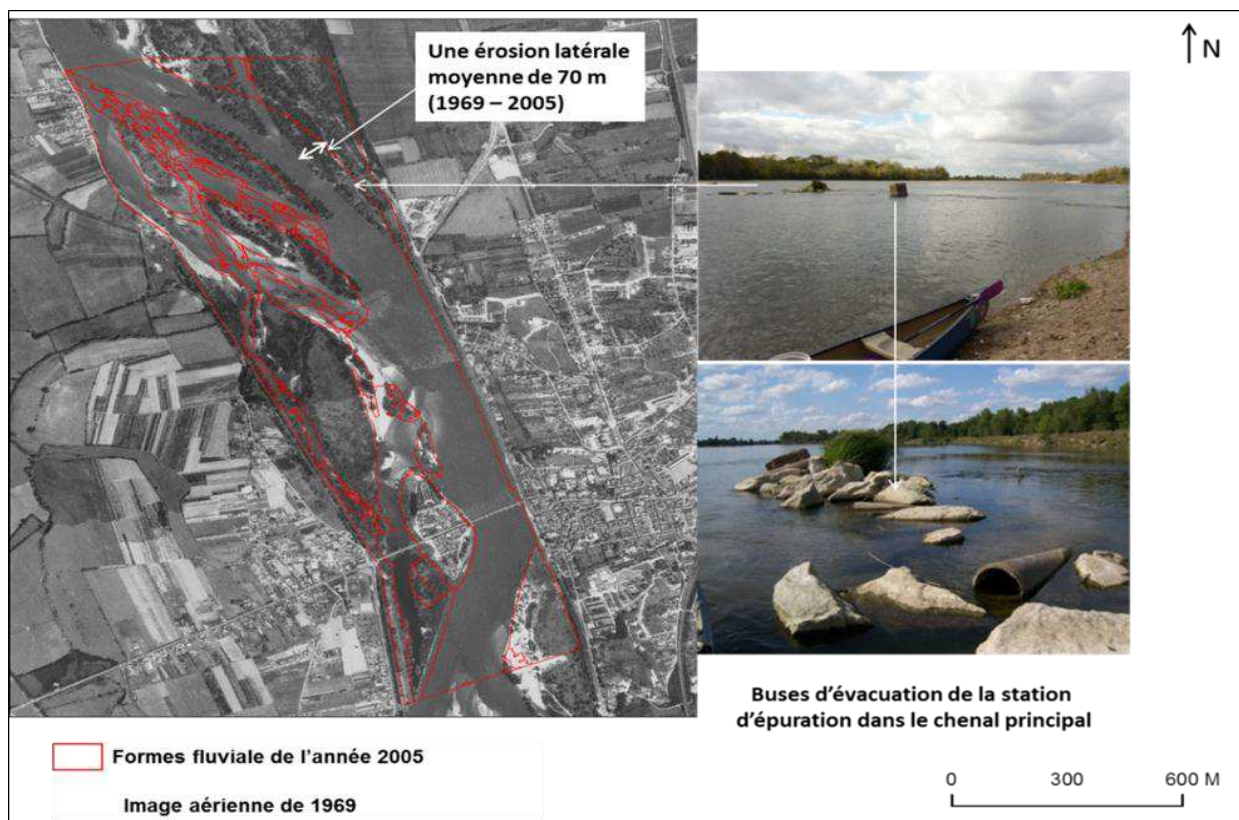


Figure 96. Site de la Charité-sur-Loire : migration latérale du bras principal vers la rive droite engendrant une importante zone d'érosion de la berge en rive droite. Les buses d'évacuation de la station d'épuration située en rive droite se retrouvent aujourd'hui au milieu du chenal principal alors qu'en 1960 elles étaient au niveau de la berge (source : photographie aérienne DREAL Centre).

1.1.2 Rétraction de la bande active et expansion du couvert végétal

Le changement du style fluvial qu'a connu la Loire entre 1850 et 1957 s'est bien fait sentir sur l'emprise spatiale de la bande active. La surface occupée par le chenal principal s'est rétrécie de 30,9 % entre 1850 et 1932, soit 0,61 km². La même tendance est constatée pour la période 1932 – 1957 avec une réduction de 26,1 %, soit 0,57 km² de la surface totale du chenal principal. Le bras principal occupe seulement 35,9 % de l'espace fluvial en 1957. **Cette rétraction peut s'expliquer par la formation des îles et des chenaux secondaires au détriment d'un espace autrefois occupée par le chenal principal.**

La seconde phase d'ajustement du chenal principal concerne la période 1957 – 1995. Cette période est marquée par une stabilité relative des valeurs de surfaces occupées par le bras principal. Ces dernières oscillent entre 34 et 38 % de la surface du lit : une réduction de 1% entre 1957 et 1969 (0,01 km²) et des croissances de 1 % (0,01 km²) entre 1969 et 1984 et de 2 % (0,04 km²) entre 1984 et 1995. Cette augmentation est due essentiellement à un élargissement du chenal principal (par érosion des berges) suite à une migration latérale de ce dernier vers la rive droite. Cette période correspond à la période des extractions massives de granulats dans le lit mineur de la Loire. On peut donc relier ce changement des formes fluviales à l'exploitation massive des sédiments au sein du lit mineur (favorisant le déficit sédimentaire).

La période 1995 – 2005 se caractérise par un rythme d'évolution relativement faible. On constate une décroissance de 2 % la surface du chenal principal (0,02 km²) entre 1995 et 2002 et une croissance de 1 % (0,01 km²) entre 2002 et 2005. **Il nous semble (pour cette période) que le chenal principal a atteint un seuil d'ajustement d'une valeur avoisinant les 36 % de la surface du lit mineur.**

Les bras secondaires ont connu une tendance d'évolution inverse à celle du chenal principal. D'abord une expansion entre 1850 et 1957, la surface totale des bras secondaires passe d'une valeur de 0,04 km² à 0,32 km² en 1939 puis à 0,76 km², soit une croissance totale de 0,72 km². Ces annexes d'écoulement représentent 36 % de la surface total du lit en 1957. La seconde phase d'évolution s'étale sur 27 années. On constate pour cette période une diminution de la superficie des bras de 9 % (0,19 km²) entre 1957 et 1969 ;

ensuite une augmentation de 2 % (0,03 km²) en 1984. À partir de cette date, la superficie des bras secondaires diminue de façon continue. Le rétrécissement de ces annexes d'écoulement se fait au profit des îles et franc-bord. On relève pour cette période (1984 – 2005) une réduction de 13 % (0,26 km²).

Comparé au mode d'évolution du chenal principal, ces bras secondaires n'ont pas encore atteint un seuil limite de rétraction. Il est probable de les voir disparaître dans les années à venir vu le rythme soutenu de l'expansion de la végétation au sein de ces bras. Une intervention humaine nous semble nécessaire voir indispensable pour maintenir ces annexes d'écoulement « garants de la biodiversité ».

Les îles se sont développées au cours de la deuxième partie du 20^{ème} siècle. Les surfaces occupées par ces formes insulaires connus trois phases d'évolutions :

1 - une période de croissance allant de 1957 à 1984. Les îles ont connu une extension spatiale de 12 %, soit un gain de surface de 0,25 km².

2 - une seconde phase caractérisée par la décroissance de la surface des îles entre 1984 et 2002. On enregistre une réduction de 4 % (0,09 km²). Cette décroissance des valeurs s'explique par la formation de franc-bord suite au rattachement des îles aux marges latérales du fleuve (et très rarement par l'érosion des berges des îles).

3 - une reprise de la croissance des surfaces des îles entre 2002 et 2005, soit un gain de surface de 4 % (0,08 km²). Cela est en grande partie le résultat de l'expansion des îles à travers le développement de la végétation dans les bras secondaires.

Comme le chenal principal, les îles ont un seuil « spatial » d'ajustement avoisinant les 25 % de la surface totale du lit. Le franc-bord commence à se former au-delà de cette valeur. La croissance des îles est aussi favorisée par l'incision du chenal principal (réduction des durées de submersion des îles et des bras secondaires).

La croissance du franc-bord est influencée par la présence d'aménagements (type chevrette ou épis) conçus sur les marges du lit du fleuve et aussi par la vitesse de comblement des bras secondaires séparant les îles des berges. Ces deux conditions sont bien réunies dans le cas du site de La Charité-sur-Loire. Cependant, l'analyse de ces formes révèle un mode d'évolution bien particulier : l'évolution spatiale du franc-bord

semble étroitement liée au stade d'évolution des îles et à l'évolution topographique du chenal principal, autrement dit à leur influence sur la capacité de transport de la charge solide dans les bras secondaires. La formation des îles a dans un premier temps, favorisé l'érosion du franc-bord en réduisant la section mouillée des bras secondaires qui les séparent du franc-bord (augmentation de la compétence des bras), ensuite ces mêmes formes insulaires favorisent le développement du franc-bord à travers l'extension de la végétation dans les bras secondaires. Cela ne peut s'expliquer que par une incision du chenal principal (impliquant une réduction des durées de submersion des bras).

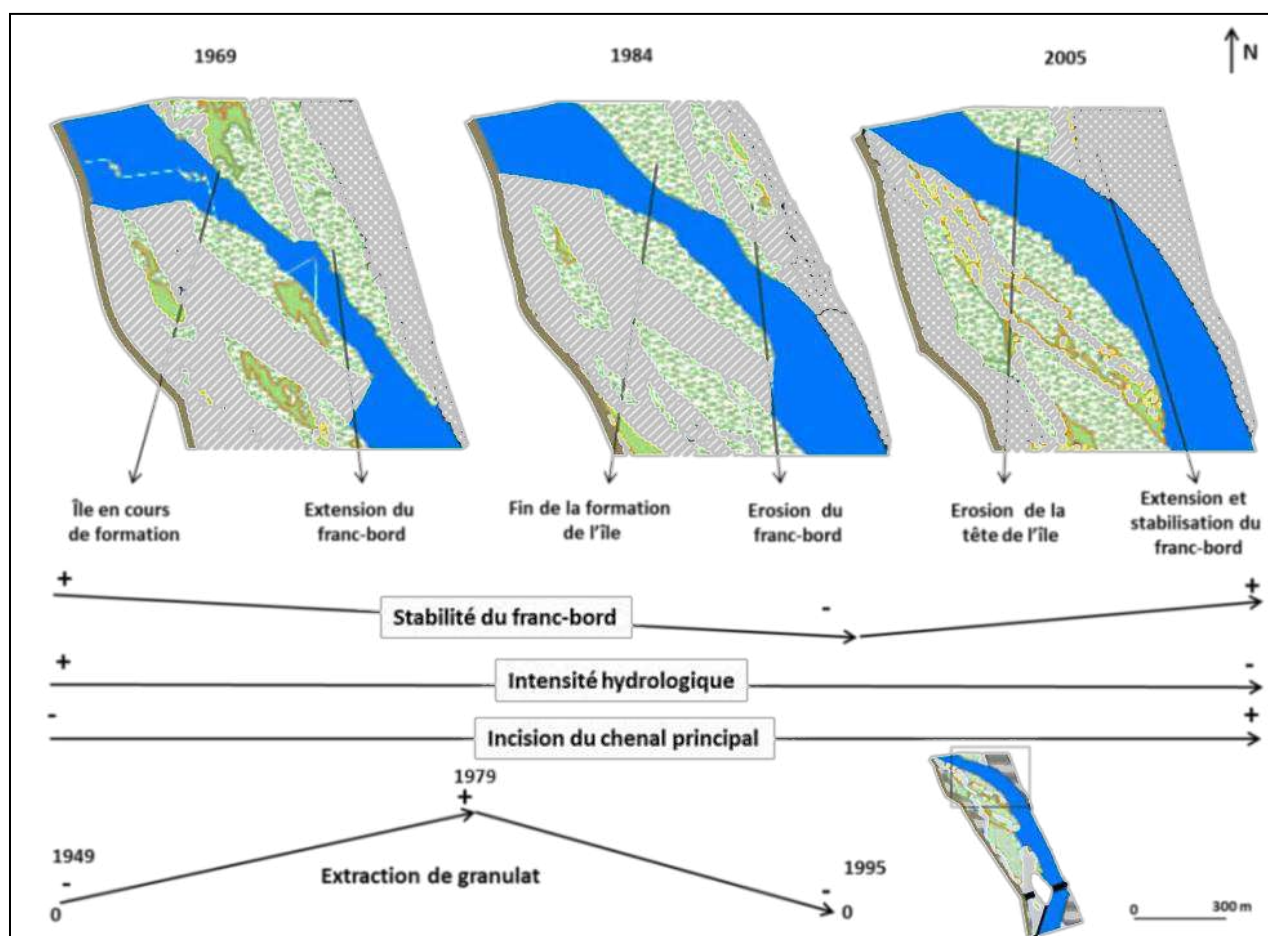


Figure 97. Site de La Charité-sur-Loire : exemple d'évolution du franc-bord en rive droite.

L'extension du franc-bord et la fermeture des bras secondaires sont étroitement liées à la réduction des durées de submersion favorisée par l'incision du chenal principal.

La surface du franc-bord a connu une croissance continue au cours de la période 1850 – 1969, soit une augmentation de 6 %. Le franc bord occupe en 1969 une superficie de 0,23 km². On note par la suite une décroissance de 2 %, soit 0,04 km² entre 1969 et 1984. Cette

période correspond à une phase de stabilisation des îles et la migration du chenal principal vers la rive droite engendrant une érosion du franc-bord en aval du site d'étude (figure 99). L'année 1984 représente un seuil temporel à partir duquel on enregistre une reprise de la croissance de la surface du franc-bord. On note pour la période 1984 – 2005 une croissance de 10 % de la surface du lit, soit 0,2 km².

L'extension spatiale du franc-bord est le résultat du phénomène de rattachement des îles aux marges du fleuve suite à la fermeture des bras secondaires par comblement (développement de la végétation). Elle est aussi indicatrice d'un affaiblissement de la dynamique hydrologique (réduction de la capacité de transport solide) au sein des bras secondaires. Cet affaiblissement peut être mis en relation avec l'incision du plancher alluvial et l'exhaussement des bras et aussi avec le contexte de calme hydrologique actuel (absence de grande crue et disparition des hautes eaux d'été).

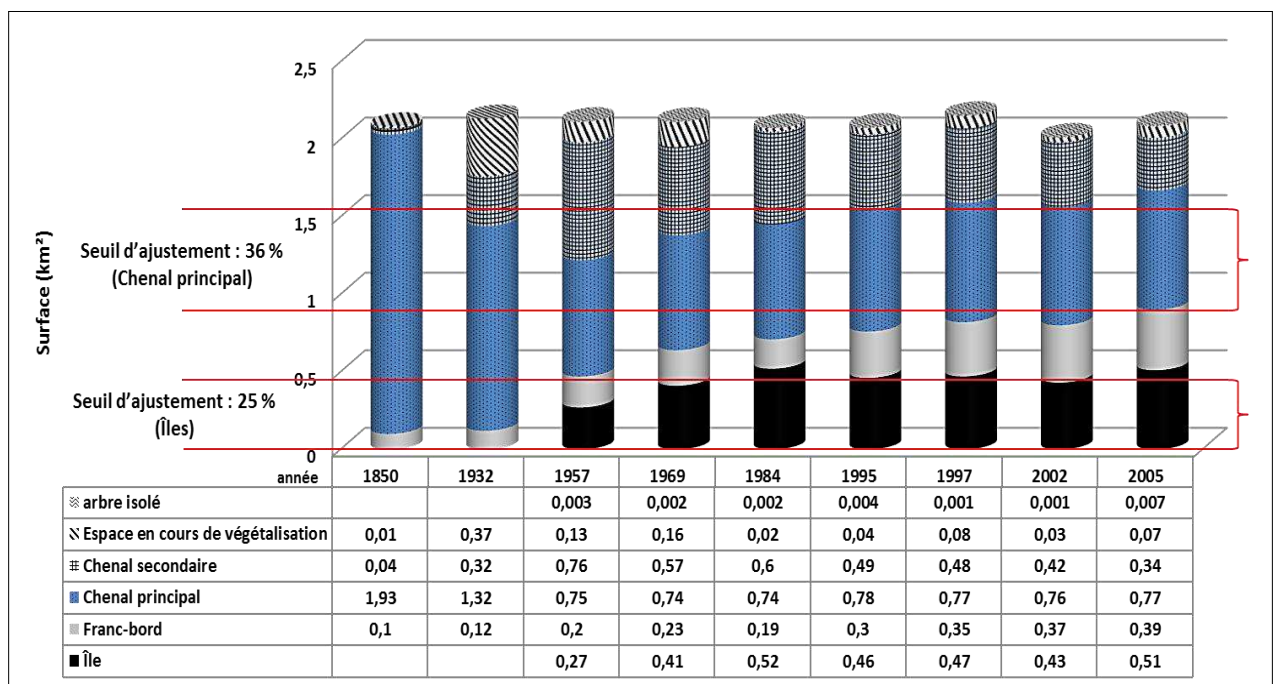


Figure 98. Évolution des différentes unités fluviales dans le lit mineur.

Les seuils spatiaux de stabilité du chenal principal et des îles, soit respectivement 36 et 25 % de la surface totale du lit mineur, au-delà de 25 % les îles se rattache au franc-bord.

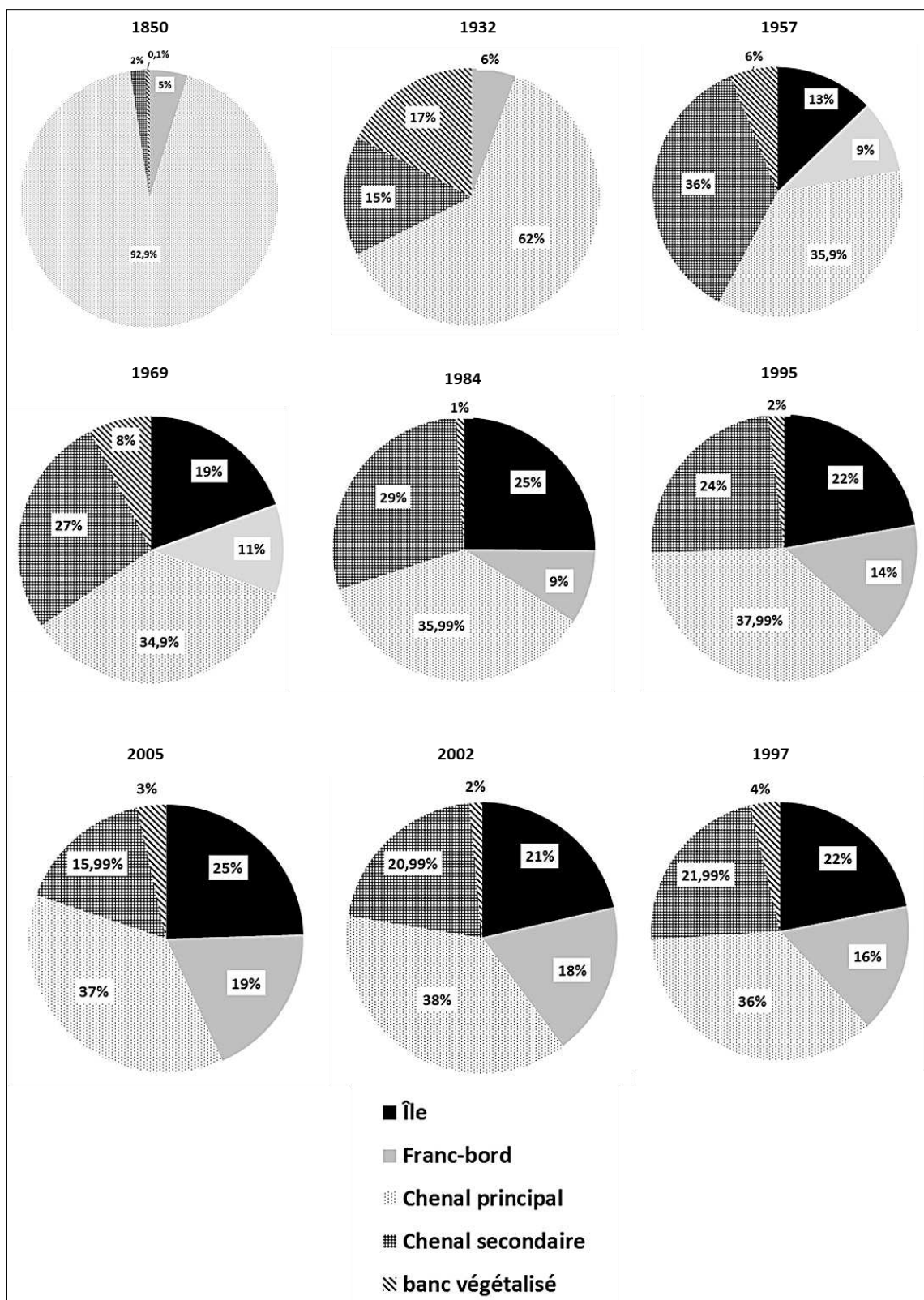


Figure 99. Évolution des surfaces des unités fluviale au cours de la période 1850 – 2005, (site de La Charité-sur-Loire).

1.1.3 Une tendance à la sédimentation influencée par la végétation et les ouvrages fluviaux

La réduction de la surface du chenal principal constatée pour la période 1850 – 1932 correspond à une phase de formation de bancs de sable dans le lit mineur. On note d'après la figure 8, la présence de zones de dépôt sédimentaire sur environ 0,4 Km², soit 19 % de la surface du lit. L'activité érosive du cours d'eau concerne des surfaces nettement inférieures, 0,009 Km², soit 0,4 %. Les zones de sédimentation sont réparties dans tout le lit (avec un secteur plus large en rive gauche). Les secteurs d'érosion sont situés au niveau de la rive droite en aval du site d'étude.

La période 1932 – 1957 se caractérise aussi par une tendance à la sédimentation même si la surface concernée par le stockage sédimentaire a connu une régression de 9 % (0,19 km²). Cela peut s'expliquer par un travail érosif du fleuve conduisant à la suppression de certains bancs formés entre 1850 et 1932. La surface affectée par l'érosion a augmenté de 4 % (0,1 km²). Les secteurs affectés par l'érosion se situent essentiellement au niveau des marges des îles et franc bord de la rive gauche. Les zones de sédimentation se trouvent essentiellement en rive droite au niveau de la partie aval du site.

Les formes fluviales (îles et franc-bord) ont connues une certaine stabilité au cours de la période 1957 – 1969. On relève une croissance de 1% de la surface de sédimentation (0,02 km²). Les surfaces érodées ont régressées de 3 % (0,08 km²). Cette stabilité des formes résulte en grande partie du développement de la végétation dans le lit mineur.

La période 1969 – 1984 se caractérise par la stabilisation des îles (stade final) et la migration du bras principal vers la rive droite. Cela a engendré une érosion du franc-bord (au niveau des deux rives) et des marges des îles (une fois stabilisé, les îles favorisent la concentration des eaux dans les bras secondaires). Il en résulte une augmentation considérable des surfaces érodées soit 7 % (0,14 km²). Les surfaces sédimentées régressent de plus de la moitié, soit 6 % de la surface du lit (0,12 km²).

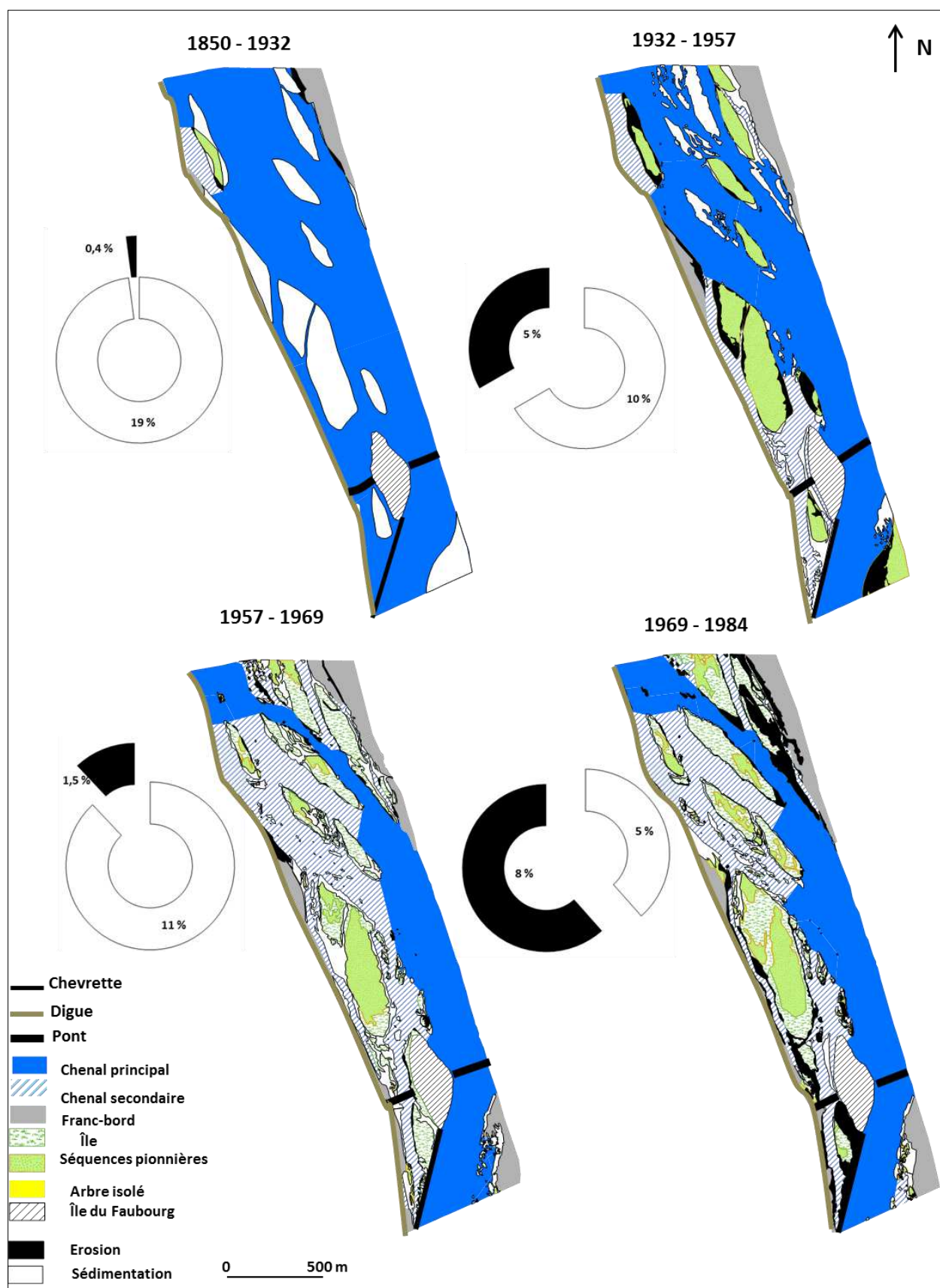


Figure 100. Évolution des surfaces d'érosion et de sédimentation entre 1850 et 1984.

Période 1984 - 2005

On enregistre pour la période 1984 – 1995 une régression de 4 % des surfaces érodées (0,09 km²). La sédimentation reprend le dessus avec une croissance de 3 % (0,005 km²). Cette inversion de tendance est le résultat d'une extension des îles et franc-bord. Les zones affectées par l'érosion concernent des surfaces relativement réduites et localisées essentiellement au niveau des marges des îles et du franc-bord. La prédominance des zones de sédimentation se poursuit le long de la période 1995 – 2005 avec des rythmes d'évolution annuels relativement élevés :

1995 – 1997 : la surface totale des secteurs de sédimentation est de 0,08 km², soit une décroissance de 4 %. La surface totale des secteurs érodés est de 0,04 km², soit une décroissance 2 %.

1997 – 2002 : une stabilisation de la surface totale des secteurs de sédimentation (0,08 km²). La surface totale des secteurs érodés a connu une baisse de 0,01km², soit 0,5 %.

2002 – 2005 : la surface totale des secteurs de sédimentation est de 0,09 km², soit une croissance de 0,5 %. La surface totale des secteurs érodées est restée stable (0,03 km²).

Par comparaison avec la période antérieure à 1984, on constate au cours de la période 1995 – 1997 une décroissance des valeurs des surfaces érodées et sédimentées ensuite pour la période 1997 – 2005, une certaine stabilité de ces surface autour d'une valeur avoisinant 4 % pour les zone de sédimentation et 2 % pour les zones d'érosion. Cela met en évidence la stabilité des îles et franc-bord en raison du développement de la végétation et surtout l'affaiblissement de la capacité de transport solide au sein des bras secondaires suite à l'incision du chenal principal (abaissement de la ligne d'eau).

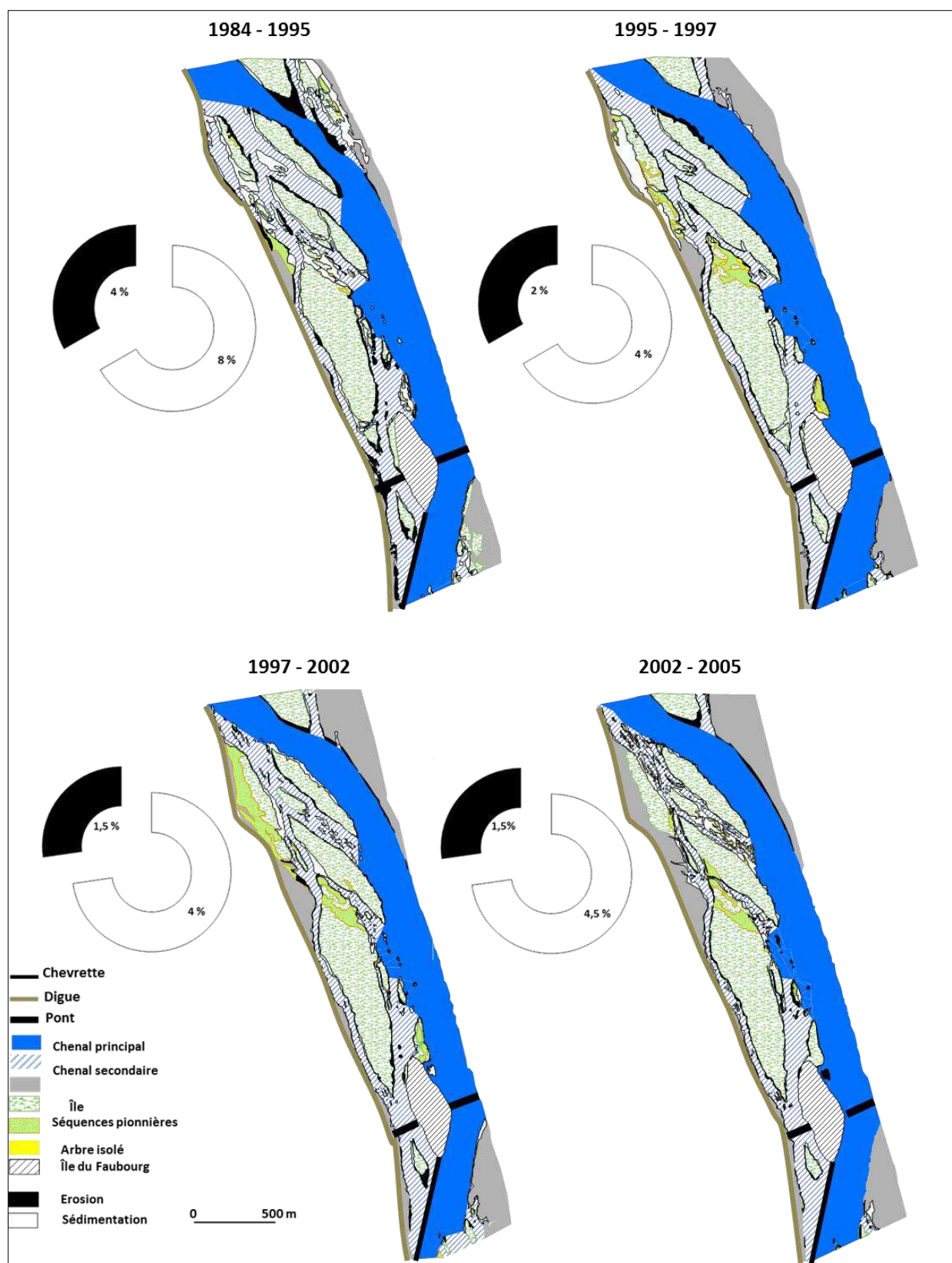


Figure 101. Évolution des surfaces affectées par l'érosion et par la sédimentation entre 1984 et 2005.

La répartition spatiale des dépôts sédimentaires et des zones affectés par l'érosion renseigne sur la force et la direction des courants. Il apparaît de façon claire que les courants les plus forts se trouvent en rive droite, en raison de la présence de la chevrette qui joue le rôle de déflecteur de flux liquide (ce qui favorise la concentration des eaux dans le chenal principal). On constate aussi la présence de zones d'érosion dans les bras secondaires. Cela atteste d'une capacité de transport solide au sein de ces annexes d'écoulement. Au cours de la période 1969 – 1984 le différentiel topographique entre les bras secondaires et le chenal principal permettait encore une activité hydro-sédimentaire au sein des bras secondaires, certaines de ces annexes d'écoulements étaient aussi larges que le bras principal.

On note aussi la formation d'un petit chenal au niveau de la chevrette, ce dernier n'existait pas en 1969. Le creusement de ce bras correspond à la période de la formation d'une brèche dans la chevrette suite à la crue de 1977. Cette brèche influence l'intensité et la direction des courants. Ce petit bras est aujourd'hui en eau toute l'année.

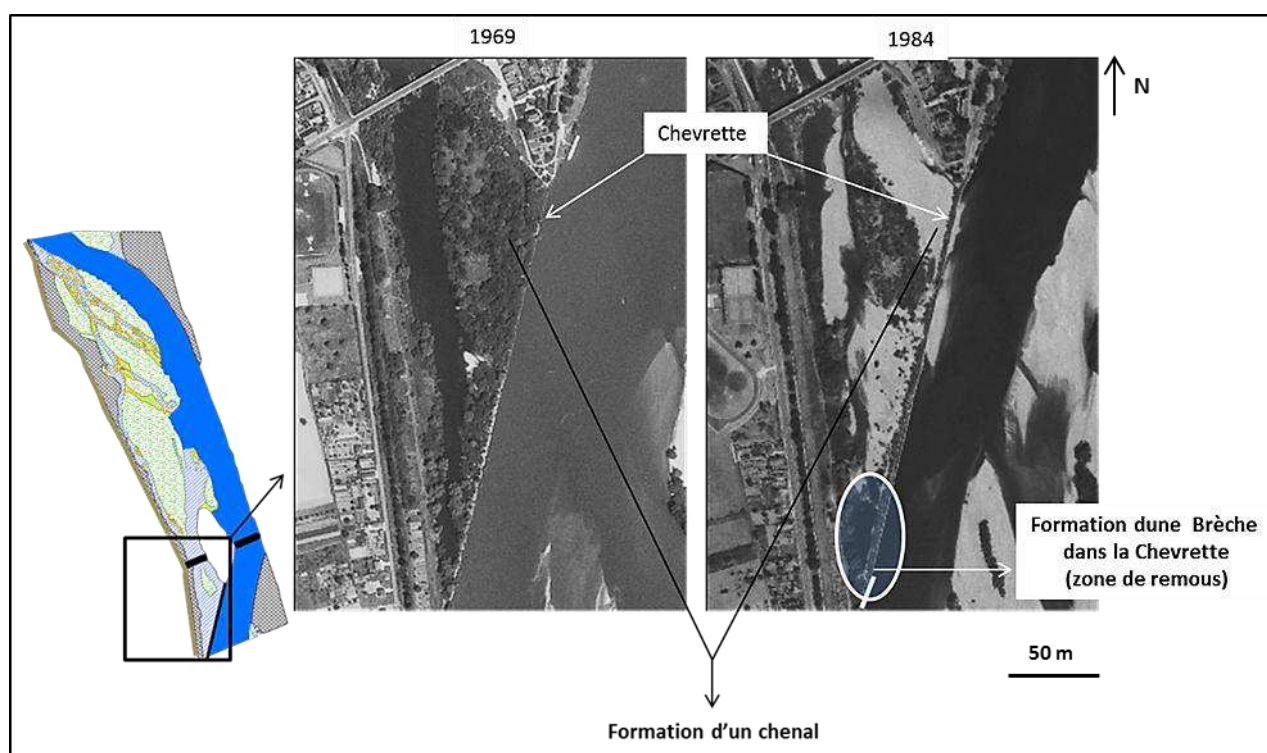


Figure 102. Érosion de l'île et formation d'un chenal en arrière de la Chevrette.

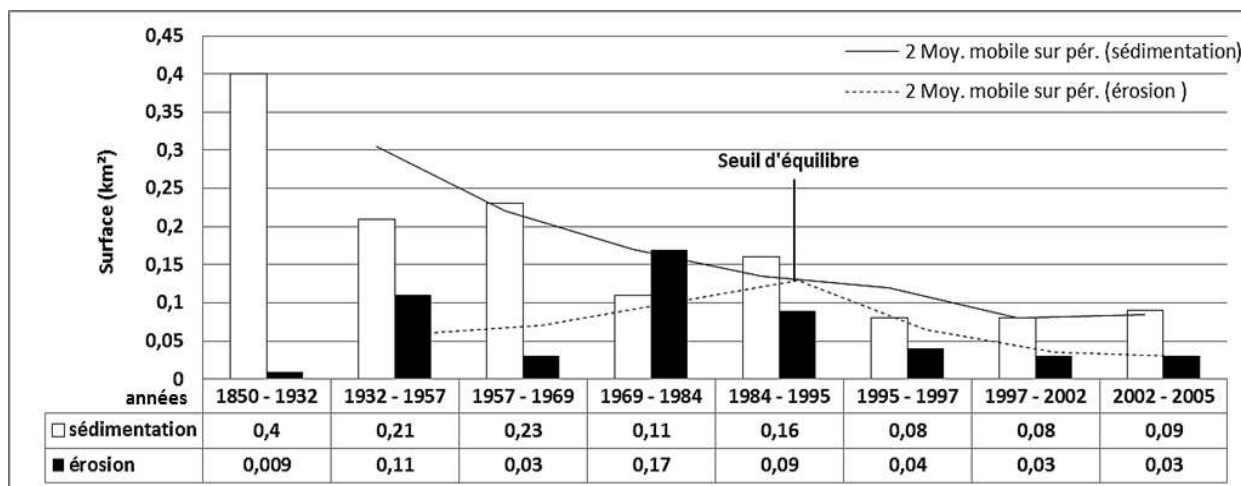


Figure 103. Synthèse de l'évolution spatiale des secteurs de sédimentation et d'érosion sur la période d'étude (1850 – 2005).

Mise en évidence d'un seuil d'équilibre entre « érosion-sédimentation » vers la fin des années 1980.

1.2 Le site atelier de Mesves

1.2.1 Métamorphose des formes fluviales et impact du forçage anthropique

Dans le secteur de Mesves, la Loire développe un style fluvial proche de celui de la Charité-sur-Loire (situé à environ 4 km en amont du site de Mesves). En dehors de la levée qui longe à moitié la berge en rive gauche, le lit mineur évolue dans des conditions relativement naturelles (sans contraintes artificielles). Les extractions de granulat dans le lit mineur sont les principales modifications anthropiques dans ce secteur (sur la période d'étude).

L'analyse de l'évolution des formes en plan met en évidence un rétrécissement de la bande active et une extension des formes végétalisées (île et franc-bord). Cela s'est traduit par un changement du style fluvial. Les modifications des formes fluviales constatées dans ce site sont proches de ceux du site atelier de la Charité : le passage d'un style fluvial à chenal large à un style à chenaux multiple s'est produit dans la même période (1850 – 1969), cette période se caractérise aussi par l'apparition des îles.

La période 1969 - 1984 se caractérise par le développement des îles et du franc-bord au sein du lit mineur. On note la formation de la grande île dite « des Barraux ». La période

1984 - 2005 est marquée par le développement de la végétation dans les bras secondaires et l'amorce du phénomène de chenalisation (en cours de développement).

On constate aussi dans ce secteur, une migration latérale du chenal principal, de la rive droite à la rive gauche en l'espace de 15 années (1969 – 1984). Le déplacement du chenal principal s'est fait de la rive droit vers la rive gauche sans avoir d'effet sur l'île des Barreaux qui se trouvait sur son passage. Cette île est restée intacte, ce qui renforce l'hypothèse d'un déplacement du chenal principal par érosion du plancher alluvial en amont de l'île des Barreaux, surtout que cette période correspond à une phase où la Loire faisait l'objet d'extractions massives du matériel granulaire (le même phénomène de migration latérale du chenal principal est constaté à la même période sur le site de La Charité-sur-Loire). L'évolution morphodynamique du site de Mesves semble être fortement influencée par un déficit sédimentaire aggravé par l'exploitation du granulat effectuée dans le lit mineur entre 1950 et 1995. La migration du chenal principal est une forme d'adaptation du profil du cours d'eau suite à la perturbation du fonctionnement hydro-sédimentaire.

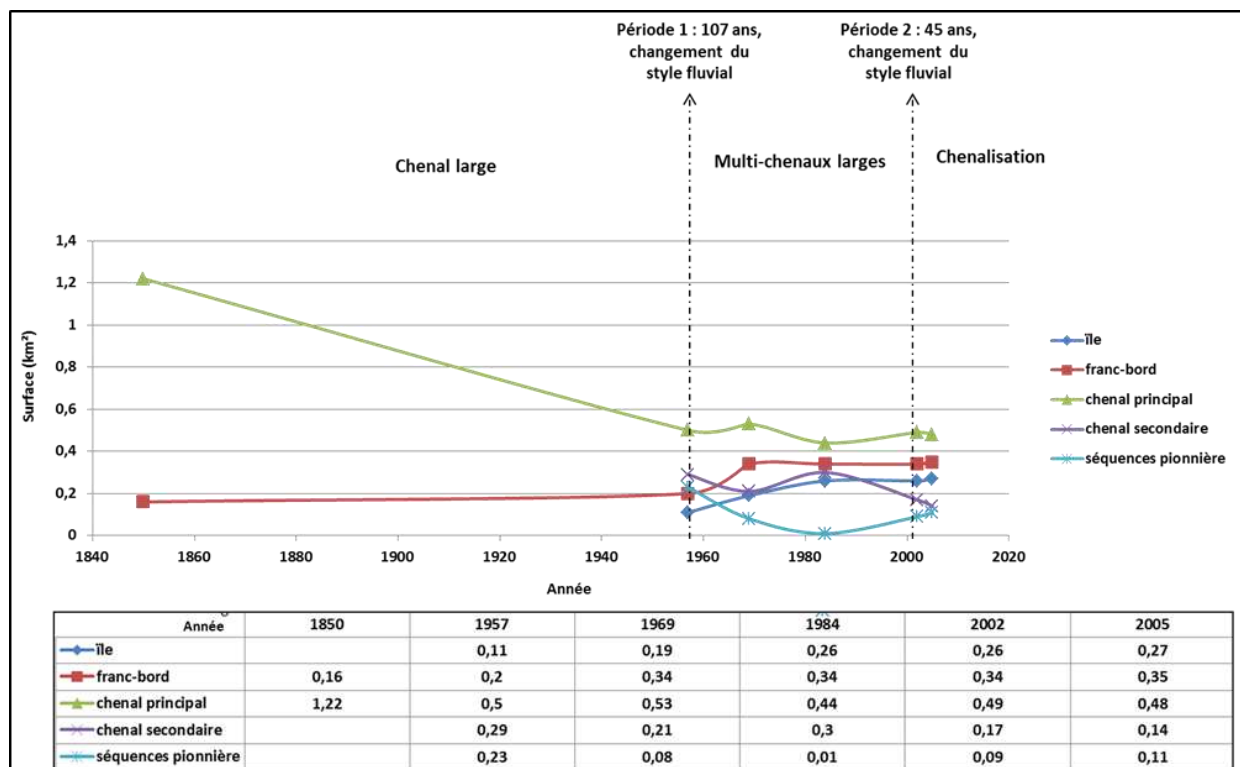


Figure 104. Site atelier de Mesves : évolution des surfaces des formes fluviales dans le lit mineur et détermination des périodes relatives au changement du style fluvial.

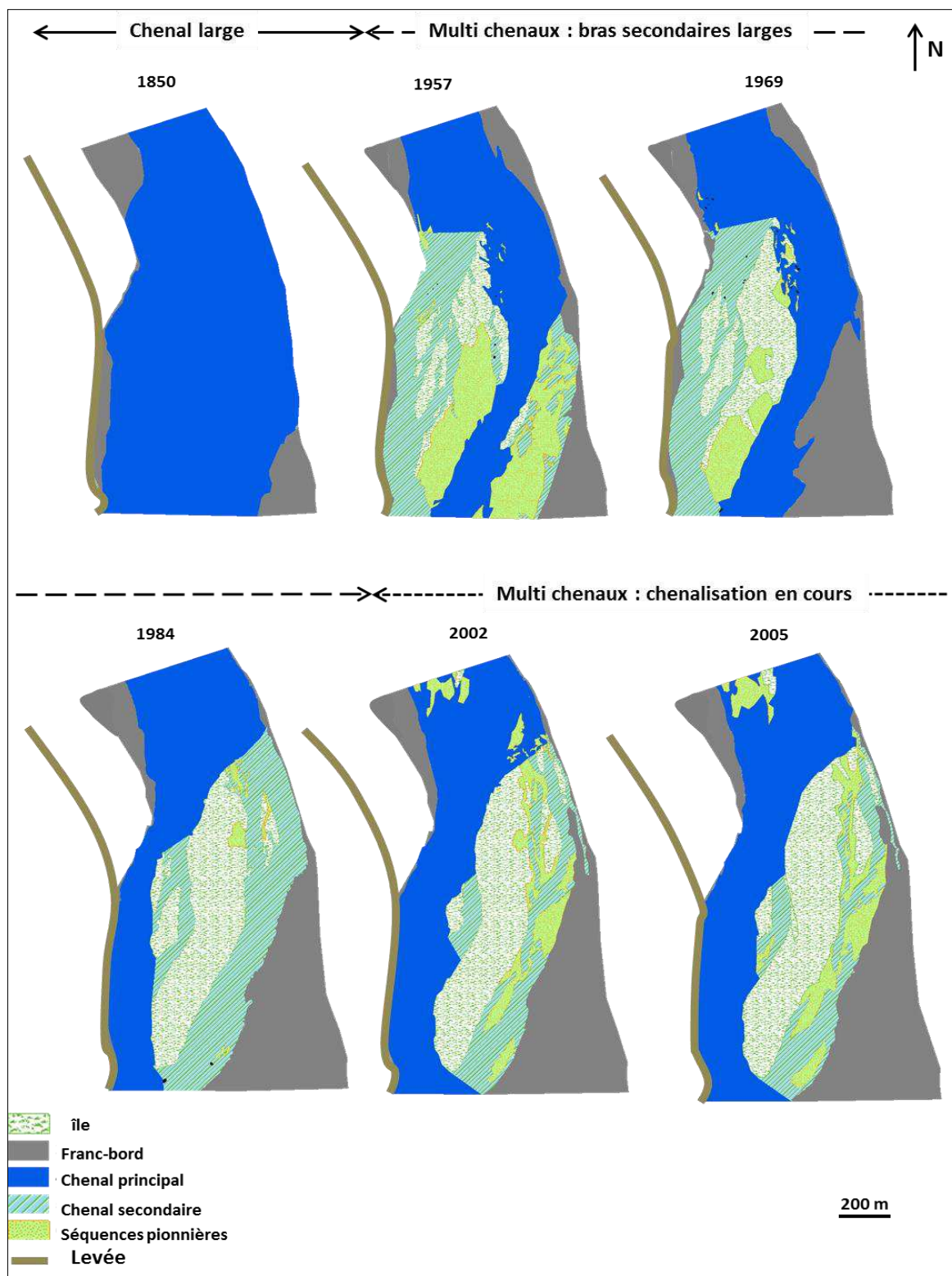


Figure 105. Site atelier de Mesves : évolution des formes en plan et mise en évidence des périodes de changement de style fluvial.

Les modalités d'ajustement spatial des formes fluviales sont proches de celles du site de la Charité-sur-Loire.

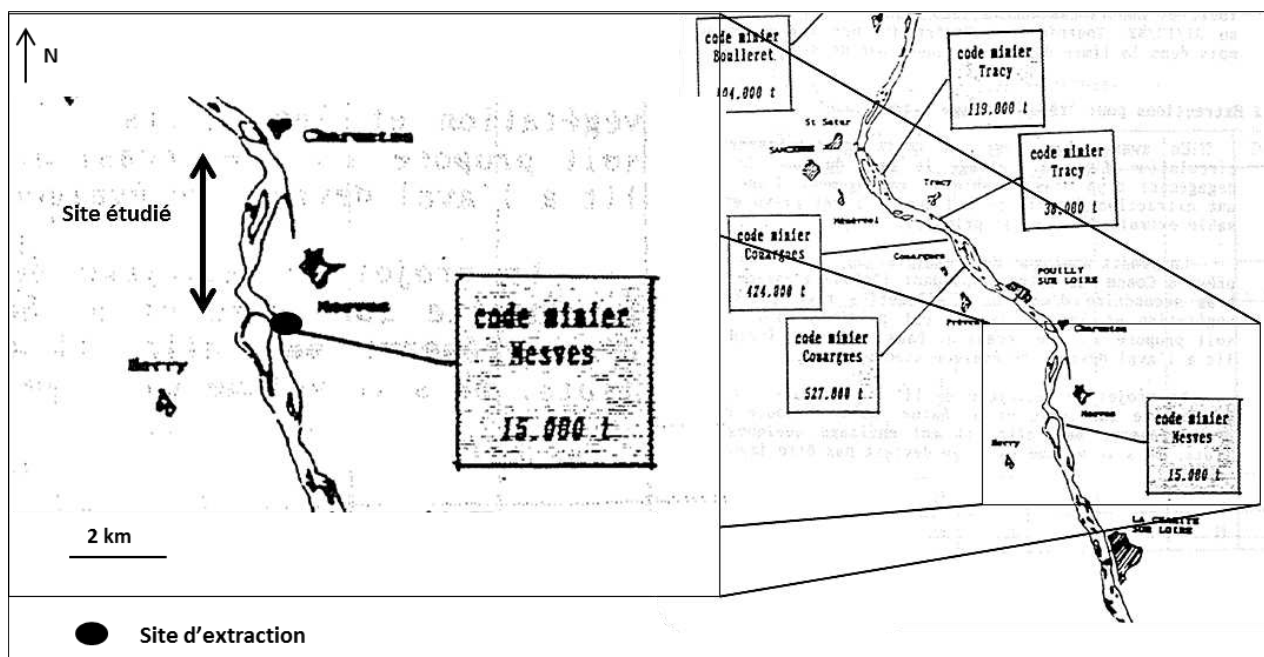


Figure 106. Localisation du site d'extraction dans le secteur de Mesves.

La quantité totale extraite dans ce site est exprimée en tonne et concerne la période 1981 – 1992 (source : Dambre et Malaval, 1993, modifiée).

1.2.2 Rétraction de la bande active et expansion du couvert végétal

La rétraction de la bande active se traduit par une diminution considérable de la surface du chenal principal. Cette dernière est passée de 1,2 km² en 1850 à 0,5 km² en 1957, soit une diminution de 51 %. La tendance de rétrécissement du chenal principal s'inverse en 1969, on enregistre une croissance de la surface de 2 % en raison de l'érosion du franc-bord en rive droite (en aval du site). En 1984, la surface occupée par le bras principal diminue de 7 % suite au développement d'îles, franc-bord et surtout à la migration de la Loire en rive gauche (occupant un ancien bras plus étroit). La période 1984 – 2002 est marquée par une croissance de 4 % de la surface occupée par le bras principal, cela en raison de la disparition de certaines îles situées en rive gauche. Une faible diminution de la surface du chenal est enregistrée en 2005, soit 1%.

Il nous semble d'après ces résultats que le seuil d'ajustement spatial du chenal principal avoisine les 35 % de la surface du lit mineur. Cette valeur est similaire à celle relevée sur le site de la Charité-sur-Loire. Les modalités d'ajustement du bras principal sont très proches dans les deux sites (déplacement latéral).

Les bras secondaires occupaient en 1957 une superficie de 0,29 km², soit 22 % de la surface du lit. Ces annexes d'écoulements ont connus, en 1969, une rétraction d'une valeur de 0,08 km², soit 4 %, cela en raison du développement des îles. La migration du chenal principal a favorisé la croissance de la surface des chenaux secondaires qui passe en 1984 à 0,3 km², soit un gain de 4 %. Puis le développement des îles et l'extension de la végétation au sein des bras secondaires engendrent une rétraction de la surface de ces annexes hydrauliques. On relève une diminution de 7 % en 2002 et de 2 % en 2005, **ces bras sont en cours de comblement. L'extension de la végétation concerne essentiellement la connexion aval des bras situés en rive droite.**

L'extension spatiale du couvert végétal a favorisé le développement des îles et l'extension du franc-bord. La surface occupée par les îles a connu une extension continue depuis 1957 jusqu'à 1984, on relève une croissance de 11 %, soit un gain de 0,15 km². La migration latérale du chenal principal (entre 1969 et 1984) n'a pas eu d'effet considérable sur l'expansion spatiale de ces formes insulaires.

La période 1984 – 2005 se caractérise par une stabilisation de la croissance des îles. Ces formes fluviales occupent depuis 1984 une surface d'environ 0,26 km², soit 20 %. Cette valeur semble être (pour le moment) un seuil d'ajustement spatial de ces formes insulaires. Les îles se sont formées de deux façons : par fusions de petites îles et îlots, c'est-à-dire : deux formes insulaires occupées par une végétation constituée de végétation arborée (type d'évolution observé en 1957) et à travers le rattachement d'îles à des bancs occupées par une végétation pionnière (en cours de développement au sein des bras secondaires), cette végétation constitue un soutien considérable à l'évolution des îles. Elle est aussi indicatrice d'un affaiblissement de la dynamique hydro-sédimentaire. Il n'y a pas eu (pour l'instant) de rattachement d'île au franc-bord en raison de la largeur du bras secondaire, ce type d'évolution n'est pas exclu dans les années à venir vu le développement rapide du couvert végétal au sein de la bande active. La typologie d'évolution spatiale des îles réalisée par **Grivel (2008)**, évoque ces modes de formation de façon détaillé sur un tronçon de la Loire allant du Bec d'Allier à Cosne (environ 60 km). Cet auteur note : « que les tendances d'évolution des îles à l'échelle du site étudié sont rigoureusement identiques pour le cas de

la Loire moyenne, mais en même temps des différences locales s'observent à travers les rythmes d'évolution. D'autres facteurs rentrent en jeu et nous pensons qu'ils sont alors plus d'ordre anthropique que physique ».

Le franc-bord se développe essentiellement en rive droite. Il a connu une croissance de 13 % entre 1850 et 1969, soit 0,18 km². Cette extension s'est faite au détriment d'un espace occupé par le chenal principal. Le franc-bord s'est développé en se rattachant à des bancs en cours de végétalisation (cette végétation se transforme au fil des années en forêt à bois dur). Cela met en évidence encore une fois l'affaiblissement de la dynamique hydro-sédimentaire de la Loire : affaiblissement de la compétence du chenal principal et réduction de la fréquence de submersion des marges du franc-bord.

La période 1984 – 2005 se caractérise par une stabilisation de la croissance du franc-bord. Ce dernier occupe depuis 1984, environ 25 % de la surface totale du lit. Cette valeur est susceptible de croître dans les années à venir car la fusion du franc-bord avec des espace végétalisés est toujours en cours : dans le bras secondaire en rive droite et en rive gauche en aval du site. Les interventions de dévégétalisation doivent cibler en priorité ce type de végétation susceptible de réduire considérablement la bande active.

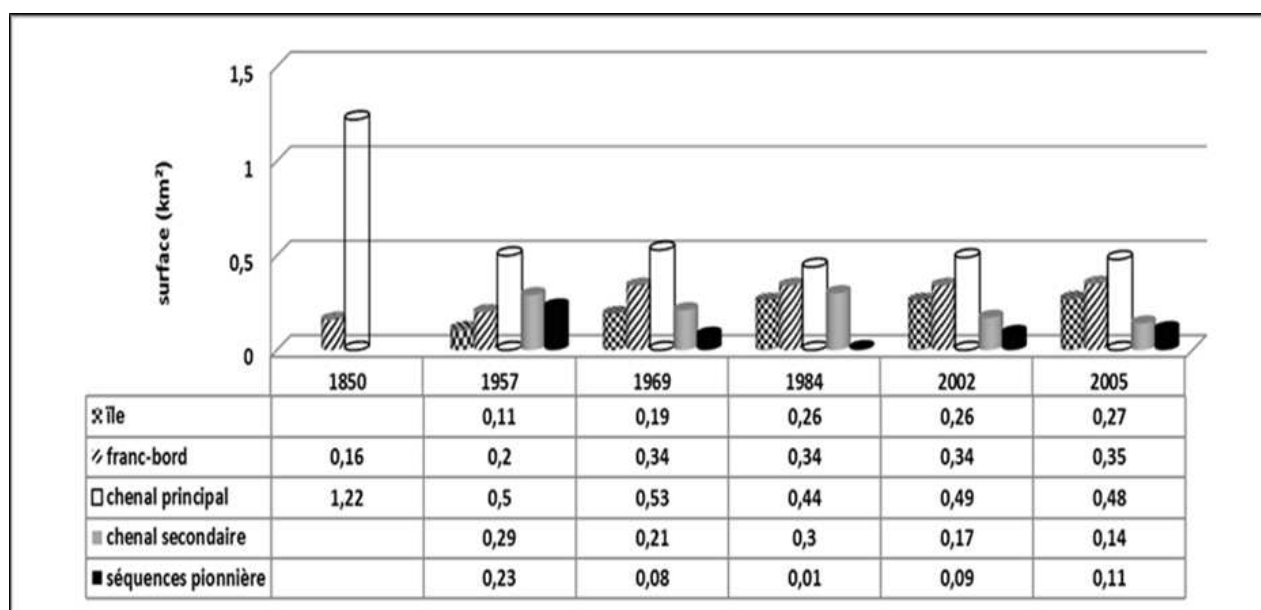


Figure 107. Évolution spatiale des formes fluviales entre 1850 et 2005 (en km²).

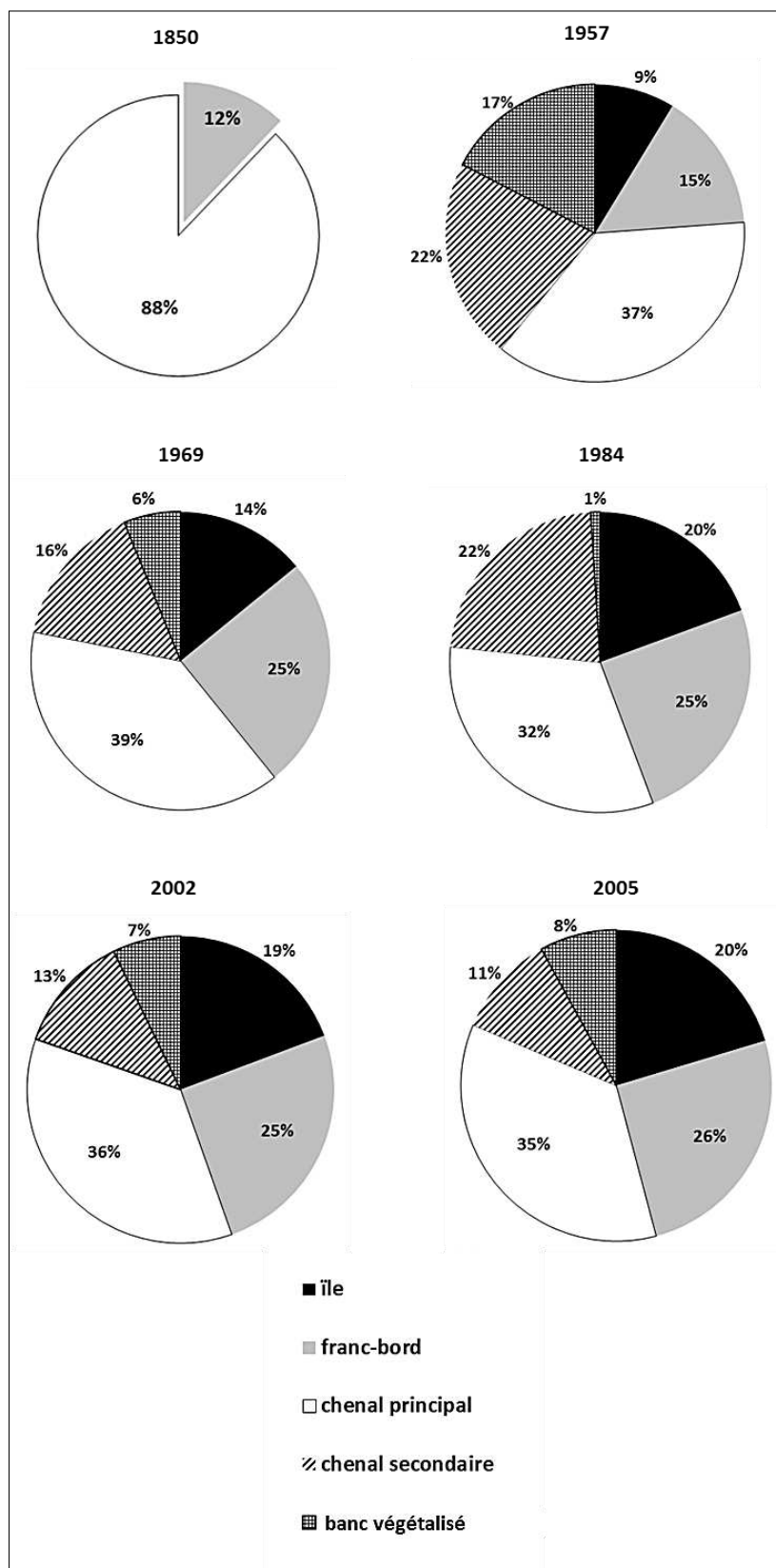


Figure 108. Site de Mesves : évolution des surfaces des unités fluviales calculées (en pourcentage) pour la période 1850 – 2005.

1.2.3 Une tendance à la sédimentation influencée par la végétation

Le développement d'île et franc-bord a favorisé l'extension spatiale des zones de sédimentation qui occupe (en 1957) 0,45 km², soit 33 % de la surface du lit. Ces secteurs sont répartis essentiellement en rive droite et au milieu du lit (ce qui favorise avec le temps le développement de l'île des Barraux). La surface des zones affectées par l'érosion représente seulement 4 %, soit 0,05 km², ces secteurs se trouvent le long de la berge en rive gauche. Les zones de sédimentation occupent (en 1969) 0,13 km², soit 10 % de la superficie du lit. Ces secteurs concernent les marges des îles et franc-bord. Les zones concernées par l'érosion restent restreintes, elles représentent 0,07 km², soit 5 % de la surface du lit. (au niveau du franc bord en rive droite).

La migration latérale qu'a connu le chenal principal au cours de la période 1969 - 1984 a favorisé l'extension spatiale des secteurs affectés par l'érosion. Ces derniers occupent une surface de 0,08 km², soit 6 %. On enregistre les mêmes valeurs pour les secteurs de sédimentation (0,08 km²), soit un équilibre entre les surfaces affectées par l'érosion et par la sédimentation.

La sédimentation sur les îles reprend le dessus pour le reste de la période d'étude (1984 – 2005). Ces secteurs se concentrent essentiellement en rive droite au sein du bras secondaire. Il en résulte, un rétrécissement de ce bras à travers la formation de bouchons alluviaux (au niveau de sa partie aval).

Les secteurs concernés par l'érosion régressent de 2 % en 2005. Ils représentent une surface de 0,01 km², soit 0,8 %. Ces zones correspondent au secteur ayant fait l'objet de travaux de restauration qui consistaient à éliminer la végétation pionnière (en queue de l'île des Barraux au niveau de la connexion aval du bras secondaire). Ces actions de restauration semblent être efficaces pour limiter l'extension du couvert végétal et par conséquent la croissance de la surface de sédimentation.

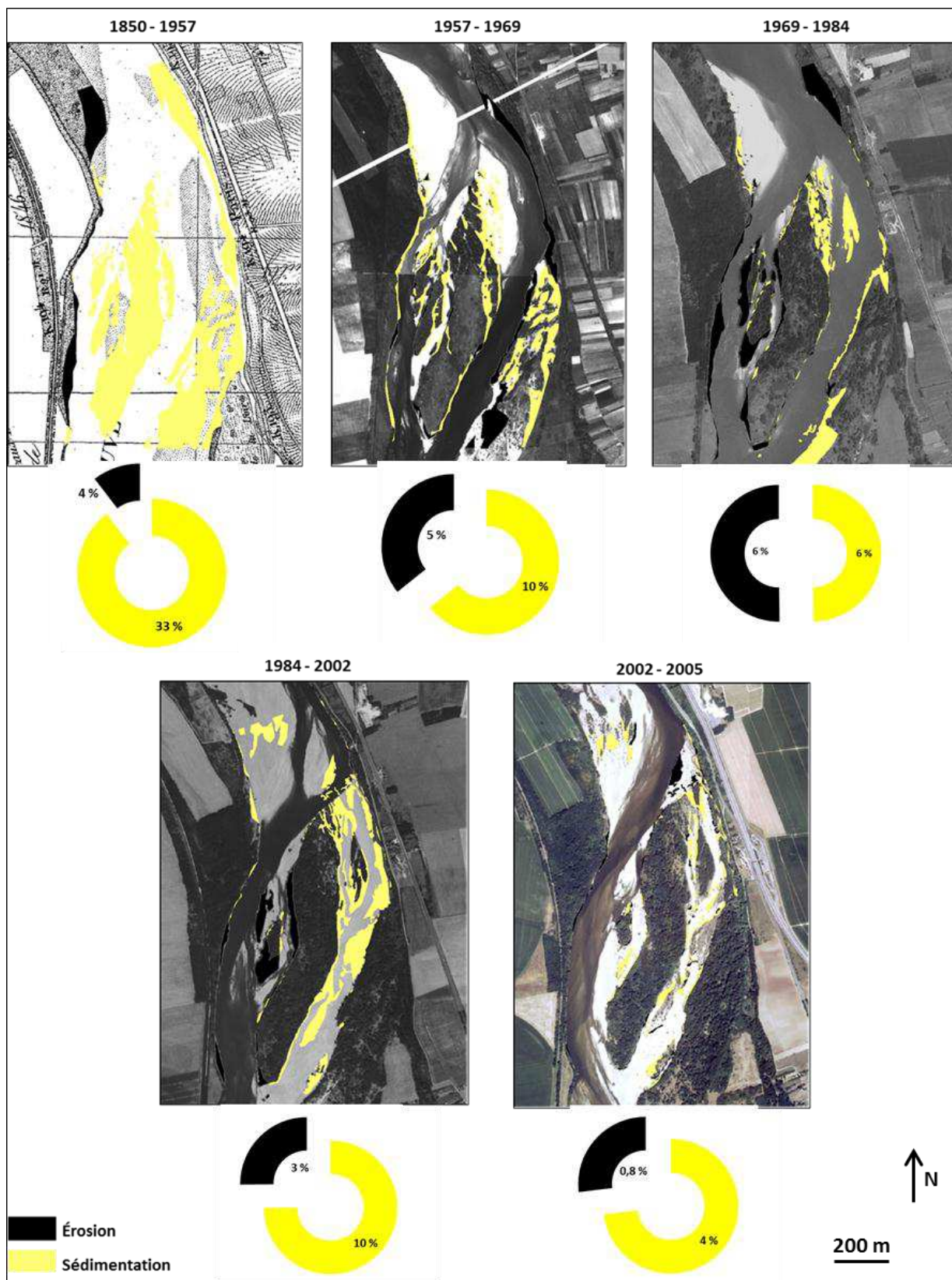


Figure 109. Site atelier de Mesves : évolution des surfaces affectées par l'érosion et par la sédimentation entre 1850 et 2005.

1.3 Le site atelier de Guilly

1.3.1 Évolution du style fluvial et impact du forçage anthropique

Comme le site atelier de La Charité-sur-Loire, le site de Guilly a été depuis longtemps le support physique de différentes actions d'aménagements. Cependant, ce secteur présente certains points de différences avec le site de La Charité. Il s'agit de la géométrie du chenal et la typologie d'aménagements (le nombre, la taille et l'agencement des ouvrages fluviaux dans le lit). A Guilly, le lit mineur de la Loire prend une forme sinueuse, le chenal principal occupe la majeure partie de ce lit. Les digues sont présentes sur les deux rives du cours d'eau. Les seuils rocheux sont : nombreux, de taille imposante et se disposent de façon transversale et parallèle au sens de l'écoulement (ce qui n'est pas le cas dans le site de la Charité). **Nous tentons donc d'analyser la réponse géomorphologique d'un autre style fluvial ayant fait l'objet de forçage anthropique d'une ampleur différentes.**

L'analyse diachronique de l'évolution spatiale des formes fluviales met en évidence une tendance permanente à la fermeture de la bande active au profit des îles et franc-bord. La diminution de la superficie du chenal principal est plus importante au niveau de la première boucle du lit. Cela est dû à de la formation de l'île dite « des Mahis », l'extension de l'île dite « du Port » ainsi qu'au développement du franc-bord en rive gauche. L'espace de liberté du cours d'eau est réduit en raison de la proximité des levées (par comparaison avec les sites ateliers de Mesves et La Charité). La présence de levée, quai et palplanches renforce la cohésion des berges tout en lui imposant une certaine géométrie. C'est essentiellement pour cette raison que le lit de la Loire a conservé son tracé depuis plus de 150 ans (sinueux). La présence de digues exclut la possibilité de migration latérale du lit mineur et réduit, par conséquent, l'apport sédimentaire en provenance des berges. Cela favorise le remaniement du stock sédimentaire disponible dans le lit pour établir un équilibre hydro-sédimentaire. Il en résulte (dans le cas d'un déficit sédimentaire) une incision du plancher alluvial.

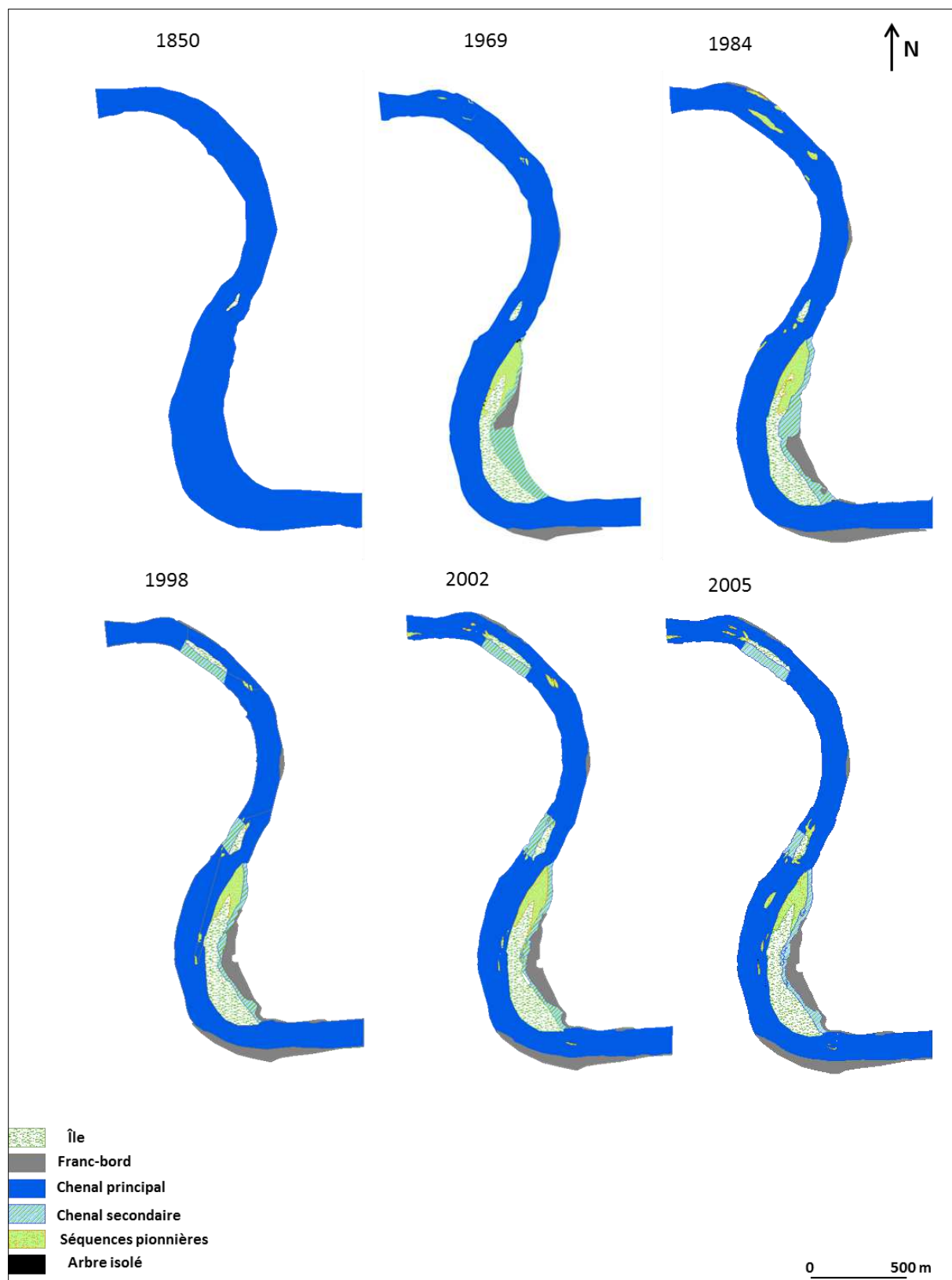


Figure 110. Site atelier de Guilly : évolution des formes en plan et mise en évidence de la rétraction de la bande active.

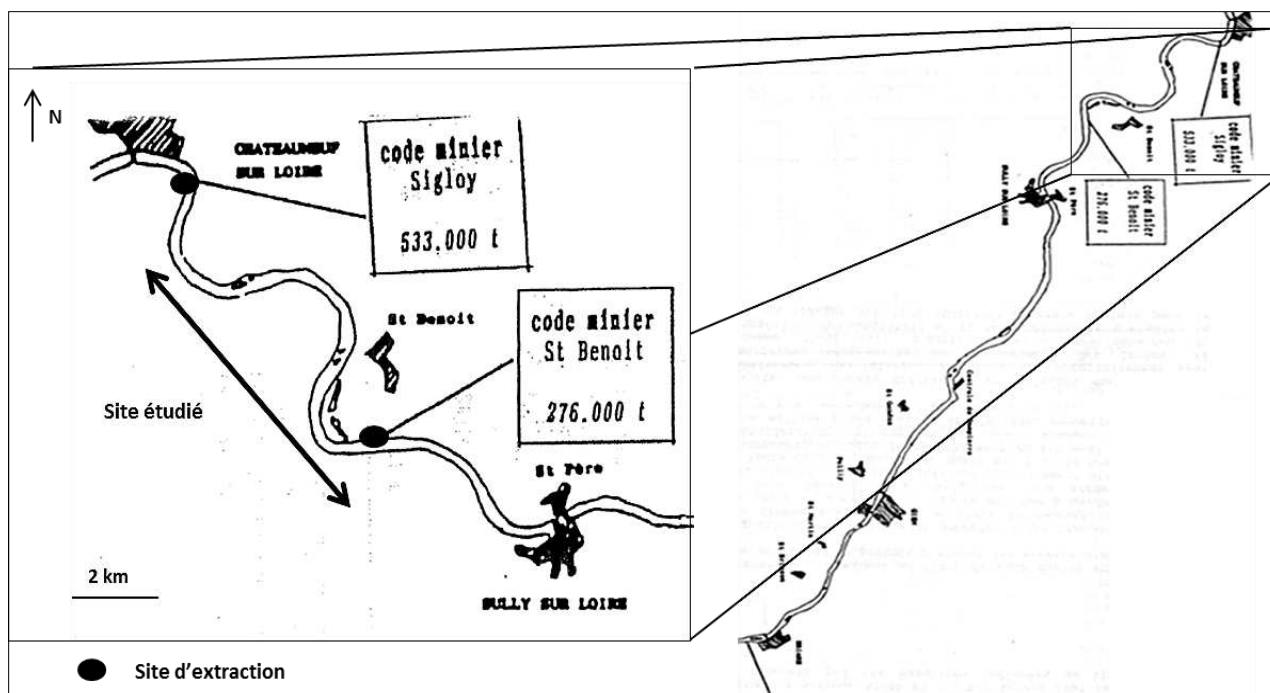


Figure 111. Localisation du site d'extraction dans le secteur de Guilly.

La quantité totale extraite dans ce site est exprimée en tonne et concerne la période 1981 – 1992 (source : Dambre et Malaval, 1993, modifiée).

1.3.2 Rétraction de la bande active et expansion du couvert végétal

En 1850, le la Loire occupait pratiquement toute la surface du lit entre levées, 2,51 km², soit 99 %. En 1969, la surface de ce chenal s'est rétrécie de 0,04 km², soit 23 %. Cette diminution s'explique par la formation de l'île des Mahis (qui a engendré la formation d'un bras secondaire portant le nom de cette île) et le développement du franc-bord.

La tendance de fermeture du chenal principal se poursuit jusqu'en 2002 avec un rétrécissement de l'ordre de 9 %, soit 0,39 km². On enregistre pour la période 2002 – 2005 une croissance de la surface du chenal de 0,01 km², soit 0,2 %. Cela traduit une faible diminution des surfaces occupées par la végétation. Ce ralentissement du rythme de rétrécissement du chenal principal peut s'expliquer par les différentes actions de restauration du lit visant la suppression des bancs végétalisés. Ces travaux de restauration ont eu lieu au cours de cette période (2002 et 2004) : dévégétalisation effectuée en amont de l'île des Boutrons (Pré-Boutrons) et au niveau de l'île du Port (au droit de Saint Benoit).

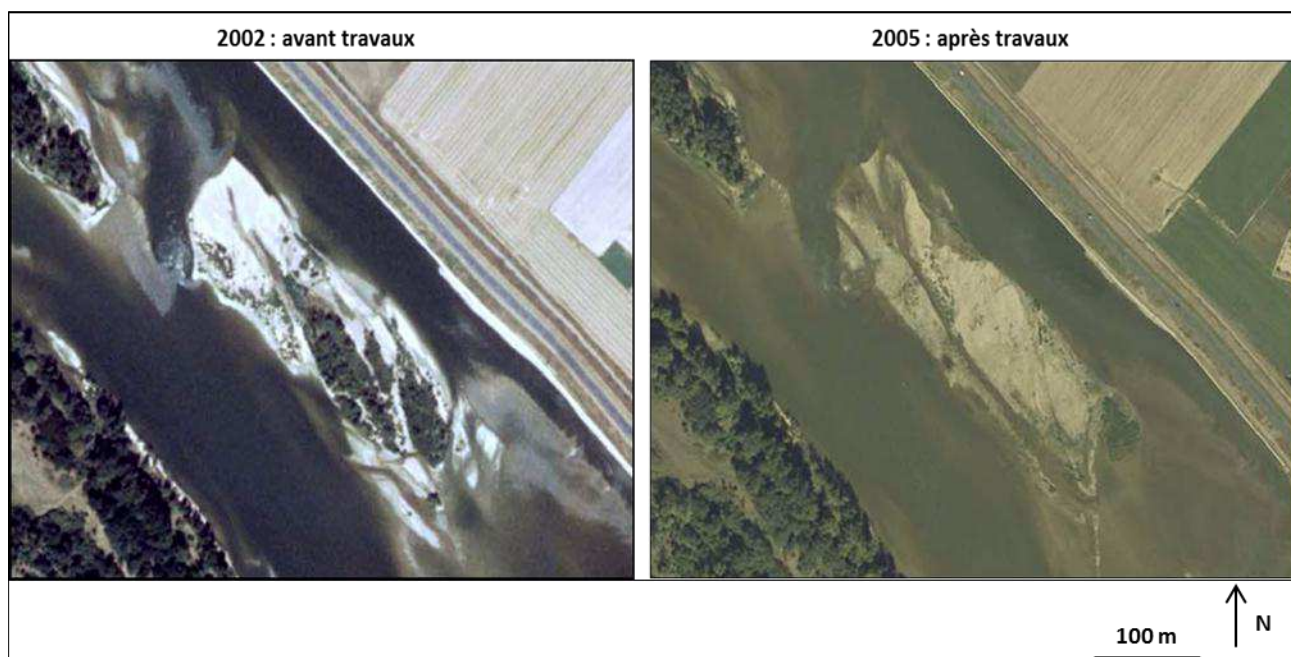


Figure 112. Secteur des Pré-Boutrons avant et après travaux de dévégétalisation.

Les travaux ont été réalisés en 2004. Ce banc de sable se situe sur l'axe d'un seuil dur qui se prolonge jusqu'à la tête de l'île des Pré-Boutrons.

Le seul bras secondaire qui existait en 1969 est le bras des Mahis (situé en rive droite en amont du site d'étude). Ce dernier occupait une surface de 0,22 km², soit 7 % de la surface du lit. L'extension spatiale de ce chenal est fortement influencée par les travaux d'extractions de sédiments effectués à cet endroit. La surface du bras des Mahis a diminué en 1984 de 0,02 km², soit 1 %, en raison de l'extension du franc-bord après l'arrêt des extractions du granulat à cet endroit (figure 113).

Deux autres petit bras se sont formés en rive gauche à partir de 1998 suite au développement de l'île du port et l'île des Boutrons. La surface totale de ces annexes d'écoulements a connu une augmentation de 0,02 km², soit 1 % en 2002 et une décroissance de la même valeur (1 %) en 2005 (en raison des travaux de restauration limitant l'extension longitudinale des îles).

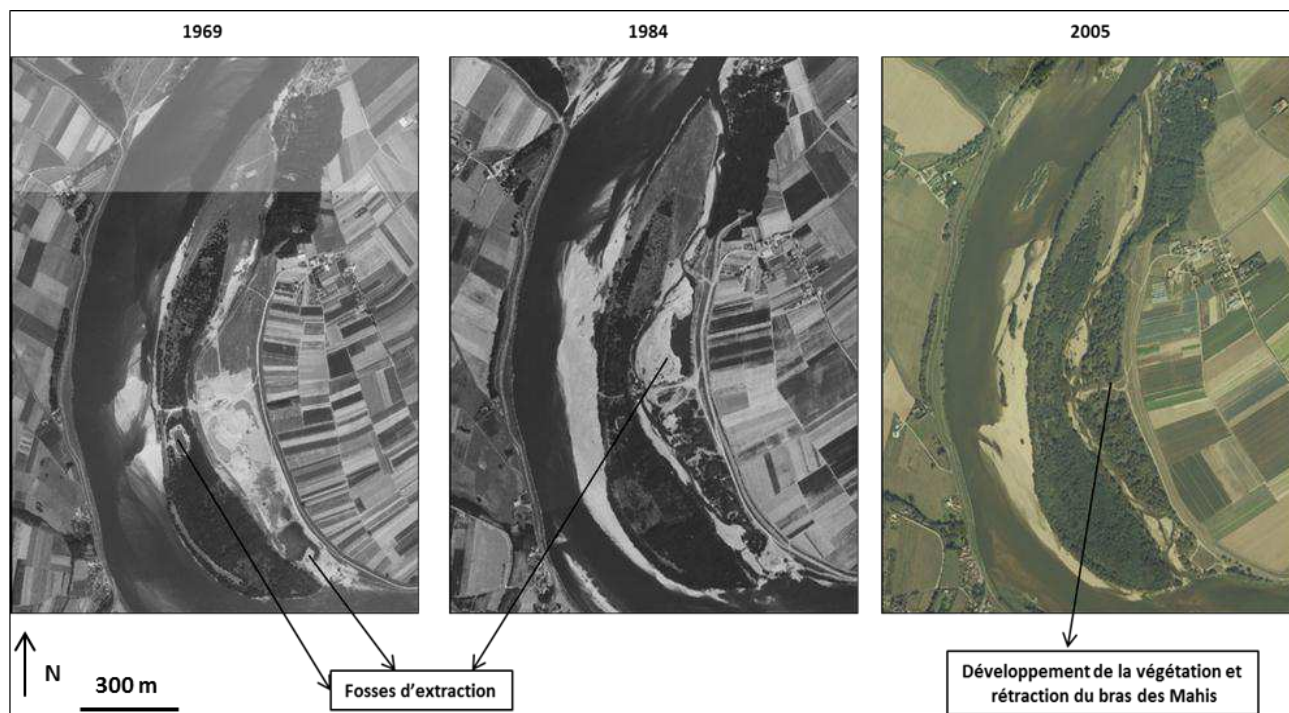


Figure 113. Influence des extractions de sédiments sur l'évolution spatiale du bras des Mahis.

On constate une rétraction considérable de la surface du bras au profit du franc-bord en 2005. Manque l'échelle graphique.

L'évolution spatiale des îles a connu au cours de la période 1850 – 1998, une croissance de 0,36 km², soit 11,7 % (développement de l'île des Mahis). On enregistre pour la période 1998 - 2002 une très faible diminution de la surface de ces formes insulaires, 0,01 km², soit 0,3 %. Cette valeur ne change pas en 2005. Le rythme de l'extension spatiale des îles est ralenti par les travaux de restauration effectués en tête d'île.

On dénombre aujourd'hui trois îles : l'île des Mahis située sur la rive droite en amont du site d'étude, l'île du Port développée au niveau de la zone de transitions entre les deux boucles du lit et l'île des Bouterons formée dans la partie aval du site d'étude. Ces îles occupent une position centrale au sein du lit, elles sont formées à l'aval de seuil rocheux. On retrouve ces points durs au niveau de l'extrémité amont de l'île des Maïs et de l'île de Saint Benoit. Ces seuils semblent être des vestiges d'anciens aménagements fluviaux. Le seuil rocheux localisé au niveau de la tête de l'île des pré-Boutrons nous semble naturel. Cet agencement spatial des seuils durs et des îles est constaté seulement dans ce site

atelier. Cela laisse penser que ces enrochements favorisent la stabilité et le développement des îles.



Figure 114. Localisation des seuils naturels et artificiels dans le site atelier de Guilly.

Une omniprésence d'ouvrage fluviaux, les seuils durs (dans la majorité des cas artificiels) influence l'évolution du profil en long et des profils en travers au sein du lit mineur.

Le franc-bord s'est développé essentiellement au niveau de la première boucle du lit mineur. Il a connu une extension spatiale continue au cours de toute la période d'étude. La surface du franc-bord relevée en 2005 (0,32 km²) est égale à deux fois celle de 1969, soit une croissance de 0,16 km² (5% de la surface du lit). Le taux de croissance le plus important est enregistré en 1998, soit 4 %. Cette croissance est favorisée par le développement de la végétation sur la marge latérale du lit, précisément, en rive droite au niveau du bras des Mahis. La fermeture de la station d'extraction de sédiments installée à cet endroit a favorisé l'extension du franc-bord et la rétraction du bras des Mahis. **L'exploitation du matériel granulaire au sein du lit mineur a un effet sur l'évolution verticale du profil en long ainsi que sur l'évolution spatiale des formes en plan.**

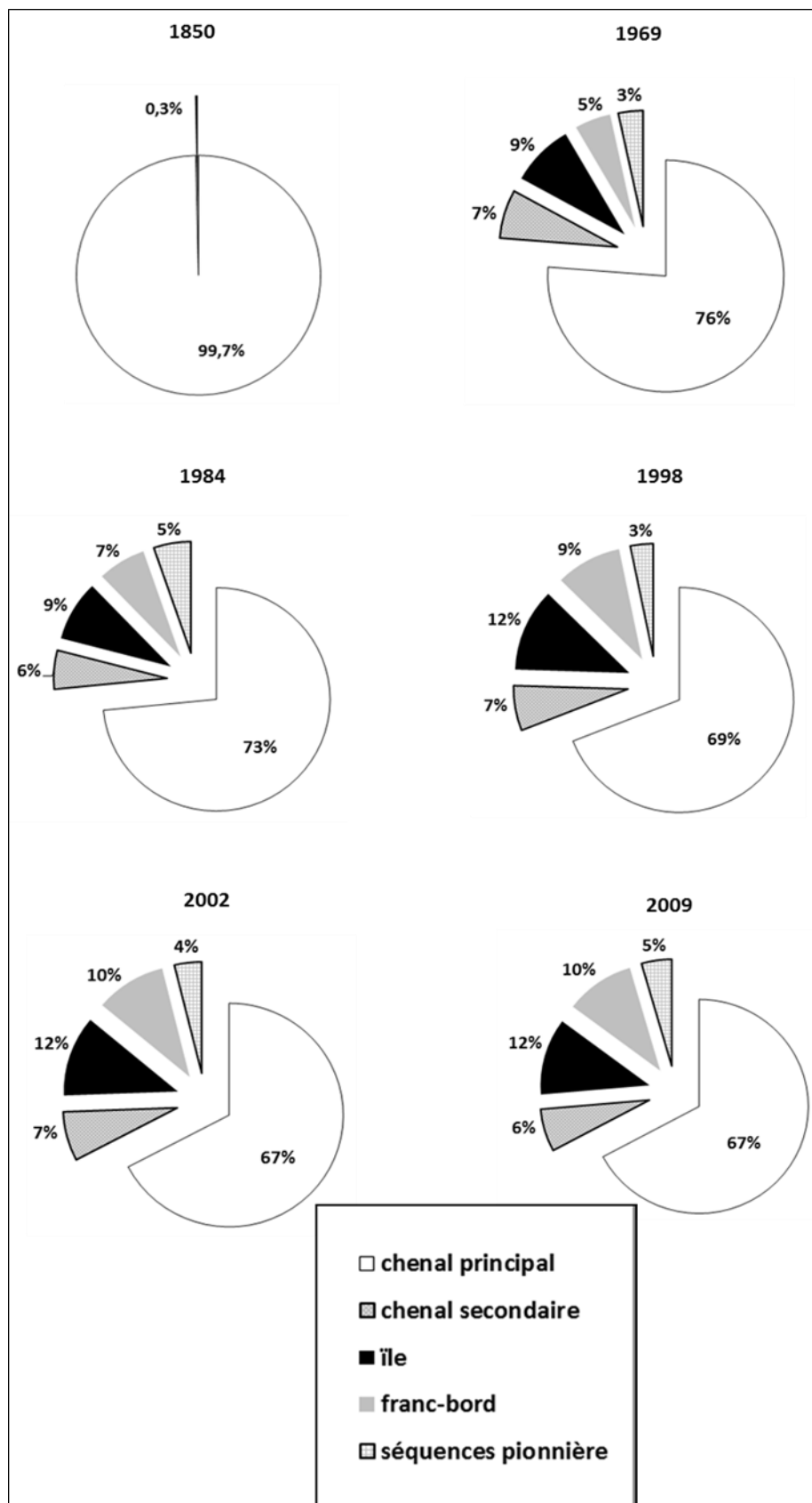


Figure 115. Site atelier de Guilly : évolution des surfaces des unités fluviales calculées sur la période 1850 – 2005.

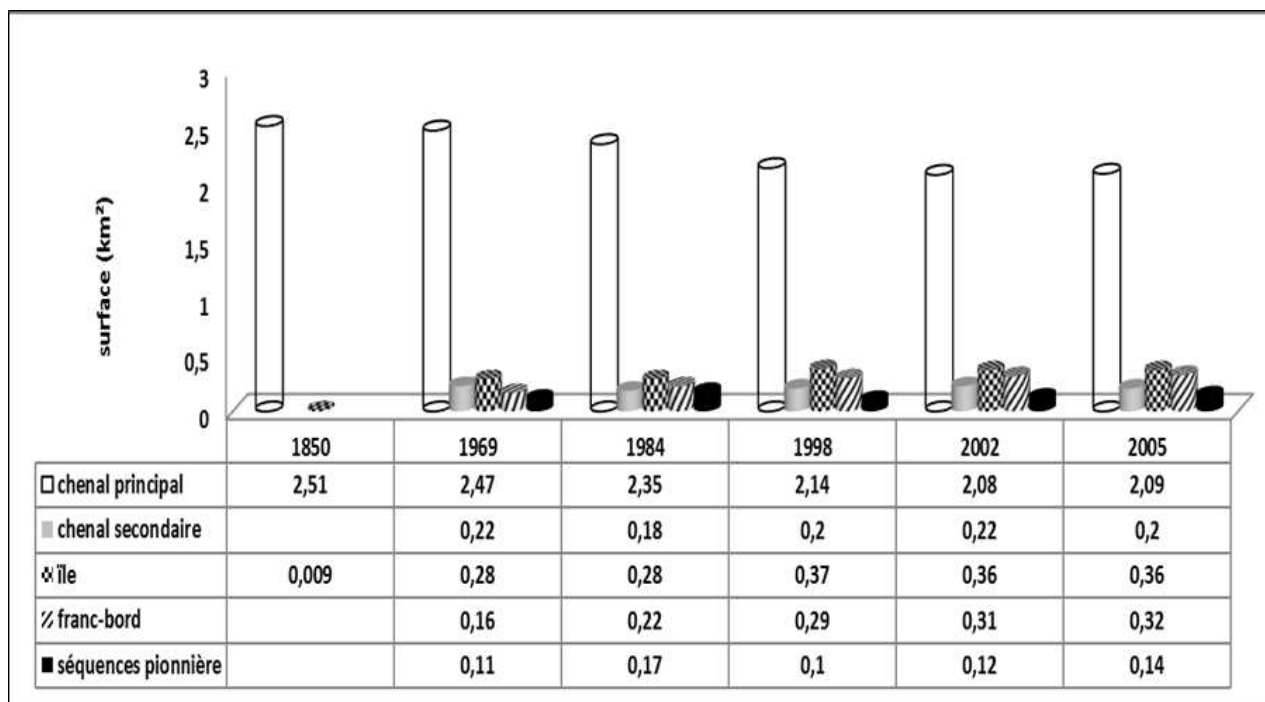


Figure 116. Évolution spatiale des formes fluviales entre 1850 et 2005 dans le site de Guilly (km²).

1.3.3 Une tendance à la sédimentation influencée par la végétation et les ouvrages fluviaux

Les secteurs de sédimentation se localisent essentiellement dans la première boucle. La réduction de la surface du chenal principal constatée pour la période 1850 – 1969 est liée en grande partie à une accumulation sédimentaire formée au niveau de la berge concave dans la première boucle. Cette accumulation d'alluvions est à l'origine de la formation de l'île des Mahis. Les zones de sédimentation représentent 0,64 km², soit 20 %. Les zones affectées par l'érosion représentent une surface nettement inférieure, 0,03 km², soit 0,93 % (le rythme annuel de sédimentation est supérieur à celui de l'érosion, soit respectivement 0,005 km²/an et 0,0002 km²/an).

Les zones de sédimentation sont réparties dans tout le lit (avec un secteur plus large en rive droite dans la partie amont). Les secteurs touchés par l'érosion sont situés en rive droit en amont du site d'étude.

La période 1939 – 1984 se caractérise aussi par une tendance à la sédimentation même si la surface concernée par la sédimentation a connu une régression de 0,47 km², soit 15 %. Cela peut s'expliquer par la formation de zone d'érosion au niveau du bras secondaire des

Mahis (en raison de travaux d'extractions du matériel alluvionnaire effectués à cet endroit). La surface d'érosion à augmenter de 0,02 km², soit un rythme annuel de 0,0004 km². Les secteurs concernés par l'érosion se situent essentiellement au niveau du franc bord en rive droite or zones de sédimentation sont répartie sur tout le secteur étudié (franc-bord rive droite et gauche et au milieu du lit).

On note une certaine stabilité des formes fluviales (îles et franc-bord) ont connus au cours de la période 1984 – 1998. Cela en raison de la régression des surfaces affectées par l'érosion qui passent d'une valeur totale de 0,05 km² à 0,02 km², soit un rythme annuel de 0,002 km². La stabilité des formes fluviale (îles et franc-bord) résulte en grande partie du développement de la végétation dans le lit mineur.

La période 1998 – 2002 se caractérise par une stabilisation des îles (développement d'une végétation arboré) et l'extension du franc-bord en rive gauche dans la partie amont. Les surfaces de sédimentation régressent de 0,07 km², soit 2 % et un rythme annuel de 0,01 km², cependant, la tendance d'évolution reste toujours en faveur de la sédimentation (avec une valeur de 0,09 km², soit 2,81 %). La surface concernée par l'érosion représente 0,62 %.

Au cours de la période 2002 – 2005, la surface totale de sédimentation diminue de 1,8 %, mais la prédominance des zones de sédimentation se poursuit le long de cette période. Les surfaces de sédimentation s'engraissent de 0,06 km², soit un rythme annuel de 0,02 km². On enregistre une croissance des surfaces érodées de 0,06 %. Les travaux de dévégétalisation des bancs réalisés en 2002 et 2004 au sein du lit ont joué en faveur de l'érosion. Ces travaux sont à l'origine de l'augmentation des surfaces érodées et semblent être efficace pour limité l'extension spatial des formes végétalisées.

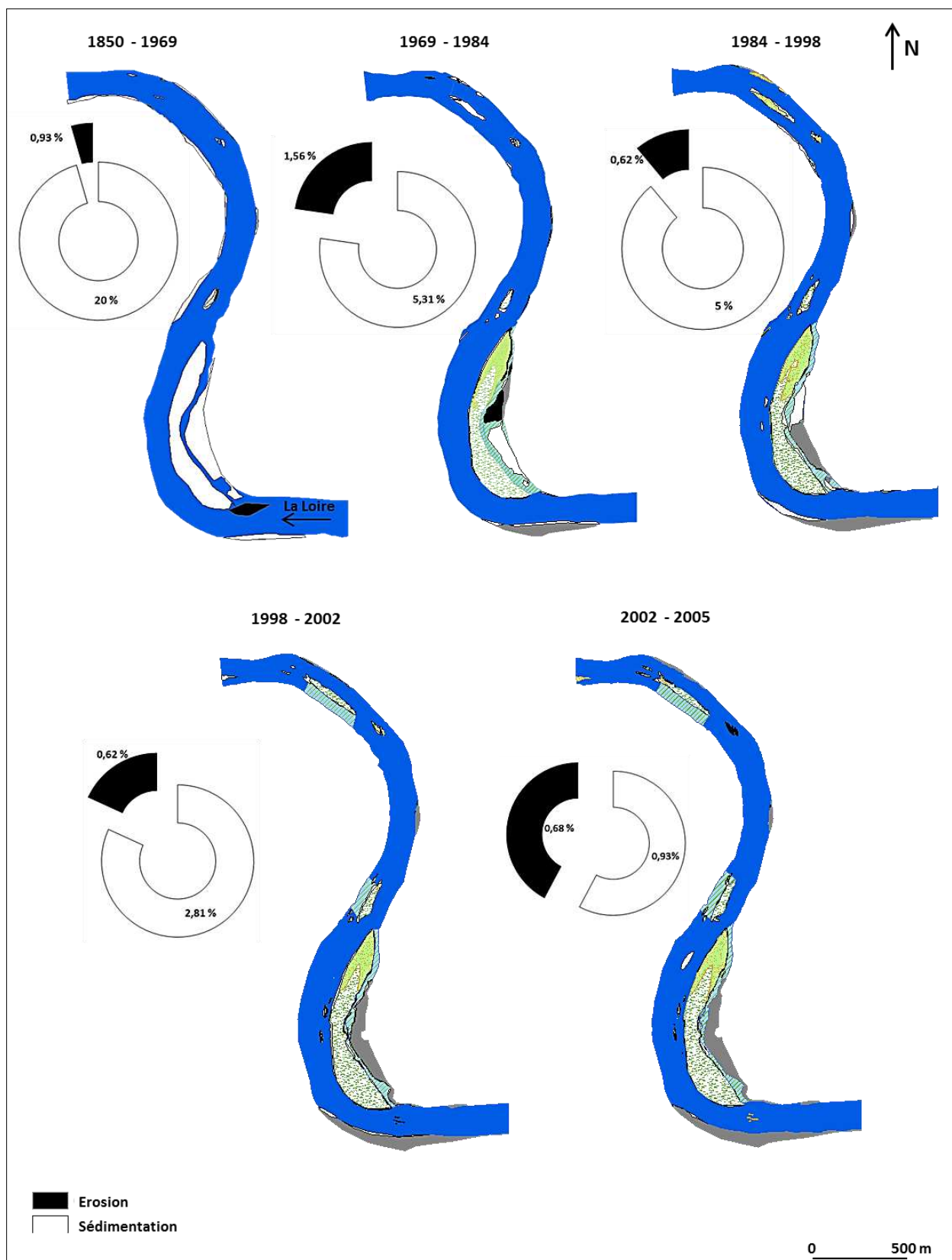


Figure 117. Évolution des surfaces érodées et sédimentées entre 1850 – 2005, on constate une tendance permanente à la sédimentation.

2. Implications de l'évolution des trois sites ateliers, *synthèse des résultats*

Nos secteurs d'étude font partie des tronçons de la Loire ayant subi des perturbations d'origine anthropiques et naturelles, ce qui provoque une altération des variables de contrôles. Ces modifications influencent les processus d'ajustement des formes fluviales (Graf, 1970 ; Schumm, 1969 ; Schumm, 1977 ; Church, 1995). L'analyse du rapport entre l'évolution morphodynamique du lit mineur, le forçage anthropique et l'évolution des conditions hydrologiques, nous a permis définir le degré d'altération de l'hydrosystème fluvial et le rythme d'ajustement du lit. Nous résumons ces résultats dans trois principaux points :

2.1 L'affaiblissement de la dynamique hydro-sédimentaire

Les résultats de l'analyse de l'évolution morphodynamique mettent en évidence une diminution de la bande active. Cela concerne les trois sites ateliers. On remarque que le rythme d'évolution spatiale de la bande active diffère d'un site à l'autre. Cela peut être lié aux conditions locales d'évolution (Xu, 1990 ; Graf 1978).

Les sites de Mesves et de La Charité ont connu un mode d'évolution très proche, le rythme de rétraction de la bande active est similaire dans les deux sites pour la période 1850 - 1969. La phase de migration latérale du chenal qui a eu lieu dans ces deux secteurs entre 1969 et 1984 a favorisé l'extension spatiale de la bande active dans le secteur de La Charité, (soit une croissance de 3 %) et une stabilisation de l'évolution spatiale de la bande active à Mesves. La rétraction de l'espace de la bande active reprend le dessus à partir de 1984 avec un rythme plus important dans le secteur de la Charité (voir figure 23).

Le site de Mesves a fait l'objet de travaux de restauration en 2004. Ces travaux sont à l'origine du ralentissement du rythme de rétraction de la bande active. L'essentiel des travaux de restauration réalisés dans le site atelier de La Charité ont eu lieu en 2005 et 2006, nous ne pouvons donc pas analyser leurs effets sur l'évolution de la bande active car nous ne disposons pas d'images aériennes postérieures à ces travaux (l'image la plus récente date de 2005).

L'évolution de la bande active dans le secteur de Guilly a connu un rythme d'évolution plus faible que celui des deux sites précédents (soit environ la moitié de la vitesse de

rétraction). Cela est étroitement lié à la durée de submersion des îles et des bancs en cours de végétalisation. La valeur du débit à pleins bords n'est pas la même dans tous les sites. On note pour le site de Guilly une valeur avoisinant $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. les valeurs relevées dans les sites de La Charité-sur-Loire et Mesves sont respectivement de l'ordre de 900 et $1200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

On relève dans le site de Guilly, sur la période 1850 - 2002 une décroissance de 25 % de la bande active. Il n'y a pas eu de changement de la superficie de la bande active en 2005. Comme nous l'avons indiqué précédemment, les travaux de restauration réalisés dans ce secteur semblent avoir un effet de ralentissement du rythme de rétraction de la bande active. On recommande donc le maintien de ces actions de restaurations afin de limiter l'extension de la végétation dans le lit.

La présence d'aménagements fluviaux (seuils durs dans la majorité des cas artificiels) au sein du lit favorise la rétraction de la bande active à travers la formation et la multiplication d'accumulation sédimentaire. Ce phénomène est évoqué par **Hooke et Harvey (1983)**, ces auteurs constatent que l'apparition de seuils (naturels) provoque une divergence des courants et une modification des courants. Il résulte de ces modifications la multiplication de bancs et la formation d'îles.

On remarque par ailleurs, que le degré d'influence des ouvrages fluviaux sur l'évolution hydrosédimentaire dépend de la hauteur de ces aménagements par rapport au fond du lit : l'influence de la Chevrette est immédiate et s'amplifie au fur et à mesure que le lit s'incise, cet ouvrage est conçu pour favoriser la concentration des eaux dans le chenal principal et réduire la compétence dans les bras secondaires en rive gauche. le débit seuil de submersion de la chevrette avoisine aujourd'hui les $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Le cas des enrochements du site de Guilly est bien différent. Le débit de submersion de ces seuils est globalement de l'ordre de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Certains de ces enrochements restent sous l'eau toute l'année. Cependant leurs influence sur la répartition spatial du stock sédimentaire semble est loin d'être négligeable. L'abaissement du fond du chenal principal augment l'influence de ces ouvrages sur l'évolution morphodynamique dans le lit mineur. L'impact morphogène des seuils rocheux à Guilly s'est fait sentir une fois que le plancher alluvial a atteint un certain

niveau d'incision. L'impact de la chevrette sur les processus de sédimentation est bien plus important que celui des enrochements dans le site de Guilly. Le rythme d'évolution de la bande végétalisée est plus important dans le site atelier de La Charité-sur-Loire.

La Chevrette de la Charité a été conçue pour favoriser la concentration du flux liquide en rive droite (au niveau du quai). Cet ouvrage influence de ce fait l'évolution spatiale de la ligne du talweg. Les résultats de l'étude réalisée par **Grivel (2008)** sur le secteur de la Réserve Naturelle du Val de Loire mettent en évidence une relation entre la migration latérale du talweg et la formation d'île. Les secteurs à îles se forment là où migre la bande active. Nous avons comparé le mode de migration du talweg sur nos deux sites ateliers (Mesves et la Charité) en utilisant les résultats de cette étude, cela afin d'analyser l'influence de la Chevrette sur l'évolution de la ligne de talweg. Il s'avère que la migration latérale du talweg concerne seulement la rive droite (la moitié du chenal principal) dans le secteur de La Charité-sur-Loire. Or dans le secteur de Mesves la ligne de talweg passe d'une rive à l'autre au fil des années (cela concerne donc toute la largeur du lit mineur). La chevrette exerce donc une influence essentielle sur l'orientation du flux liquide et par conséquent sur le mode d'évolution morpho-sédimentaire du lit mineur (figure 25).

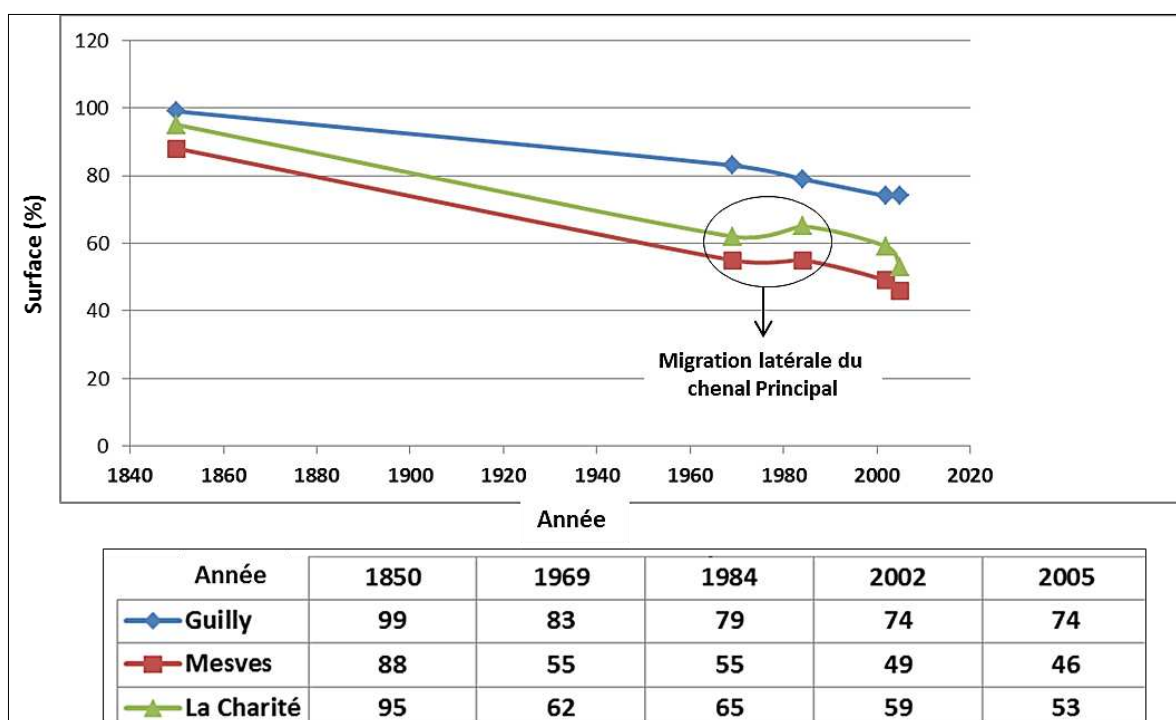


Figure 118. Évolution spatiale de la bande active dans les trois sites atelier : Mesves, Guilly et La Charité (1850 – 2005).

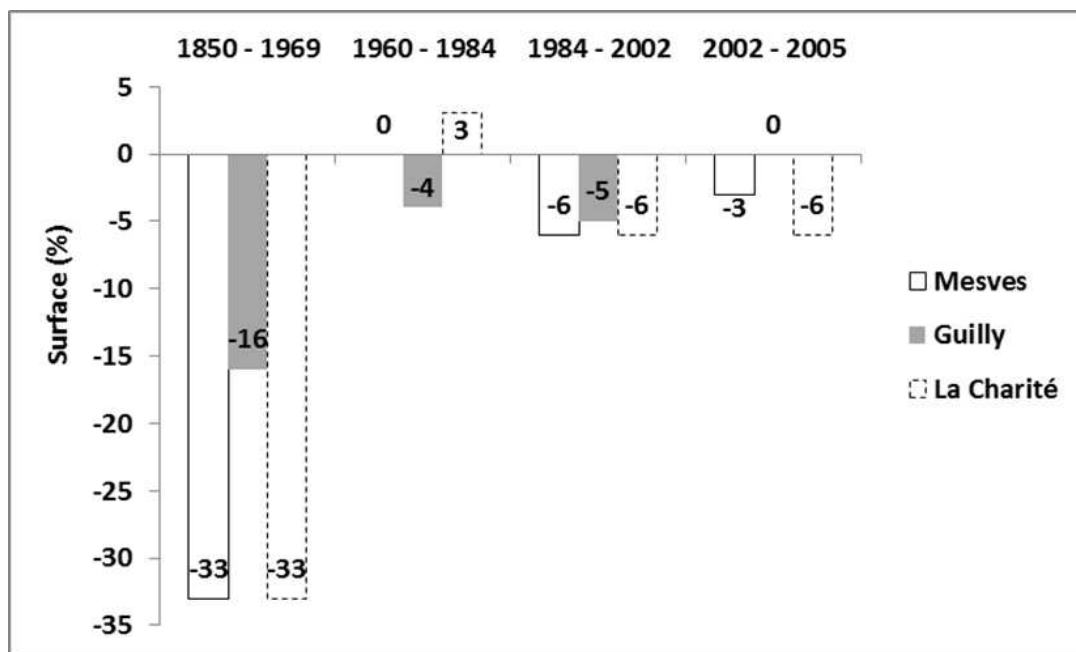


Figure 119. Rythme annuel d'évolution de la surface occupée par la bande active sur les trois sites ateliers.

Cette évolution est influencée par la migration du chenal principal et dans une moindre mesure par les actions de dévégétalisation (augmentation de la surface de la bande active).



Figure 120. Influence de la chevrette sur le flux liquide dans le site de La Charité-sur-Loire.

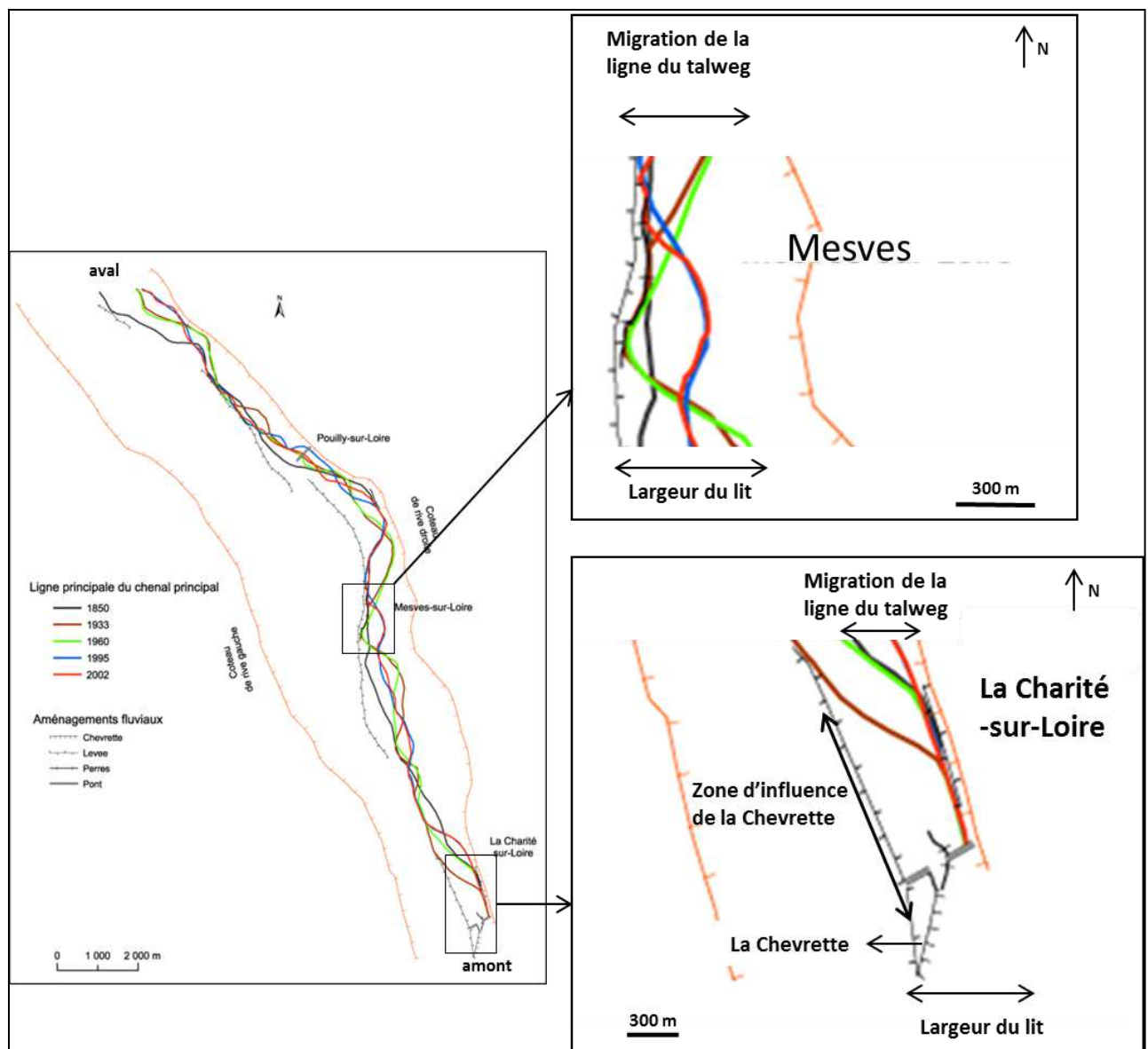


Figure 121. Rapprochement du mode de l'évolution latérale de la ligne du talweg entre 1850 à 2002, exemple des sites ateliers de Mesve et de la Charité-sur-Loire.

L'évolution de la ligne de talweg est influencée par la présence de la chevrette (source : Grivel, 2008, adaptée).

2.2 Le développement rapide du couvert végétal

L'extension du couvert végétal concerne les trois sites ateliers. Ce constat est clairement démontré à une échelle plus grande du corridor ligérien (Gautier et *al.*, 2001 ; Gautier et Grivel, 2003 ; Grivel 2008). L'évolution de la végétation a favorisé la modification de la géométrie du lit à travers la formation d'îles et de fracs-bords, « La ripisylve agit sur les éléments physiques, le sédiment et l'eau » (Piégay et *al.*, 2003, page 117).

Au niveau des secteurs d'étude, L'espace occupé par la végétation atteint en 2005 une valeur de 54 % à Mesves, 47 % à La Charité et 26 % à Guilly. On note aussi l'influence de la migration latérale du chenal principal dans les sites de Mesves et de La Charité (ralentissement du rythme d'évolution). Les travaux de restauration réalisés dans les secteurs de Guilly et Mesves ont limité l'extension spatiale de la végétation.

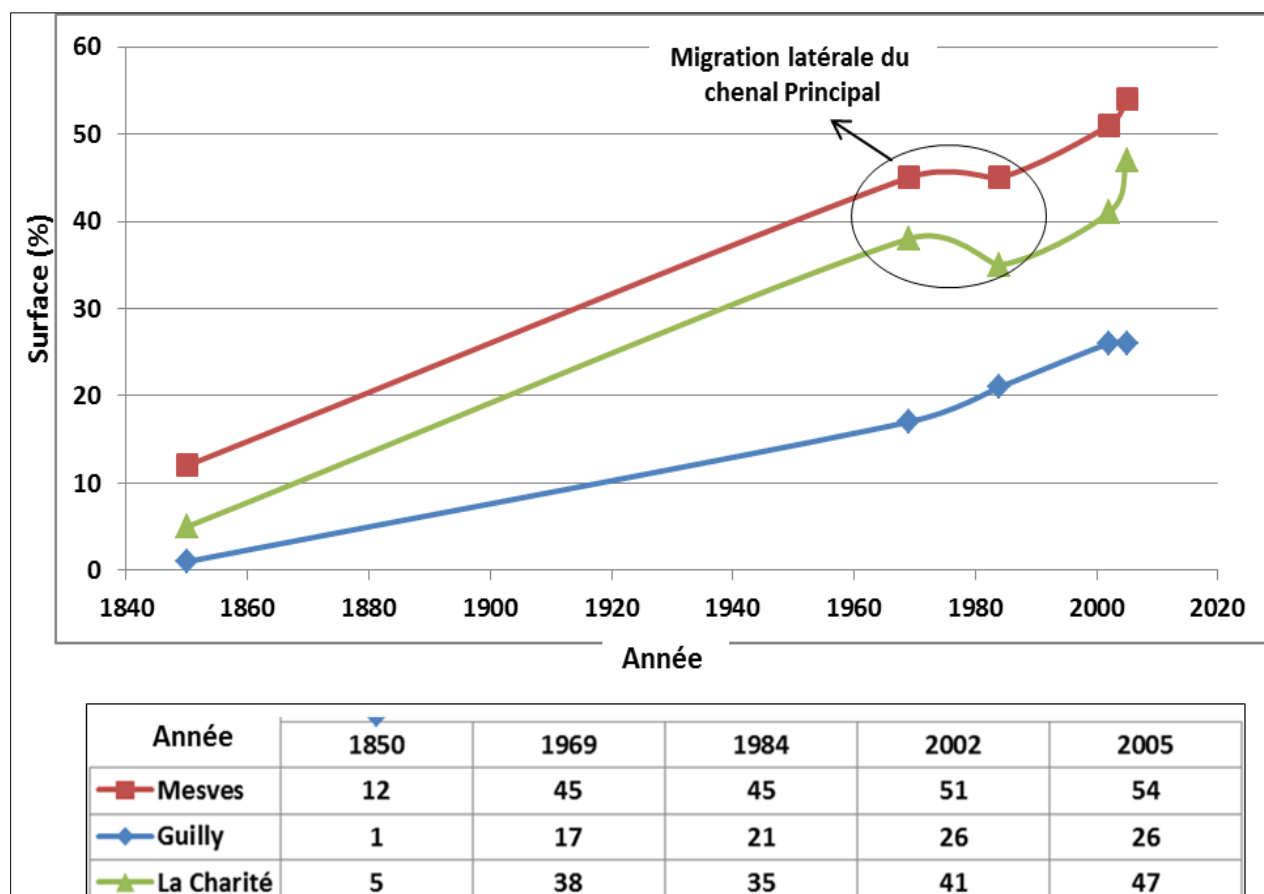


Figure 122. Évolution spatiale du couvert végétal dans les trois sites atelier : Mesves, Guilly et La Charité (1850 – 2005).

La migration latérale du chenal principal a eu un effet de ralentissement voir de diminution de l'espace occupée par la végétation.

Une tendance à la stabilité des formes végétalisées : *s'agit-il d'une évolution irréversible ?*

La végétation arborée (forêt à bois tendre et dur) a connu une expansion considérable au cours des 50 dernières années (Grivel, 2008). La végétalisation s'accélère au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle avec comme facteur aggravant l'exode rural (déclin du pâturage sur les îles) et l'installation de l'industrie du granulat dans le lit de la Loire (Gautier et Grivel, 2012). Les îles et les marges du fleuve sont aujourd'hui colonisées par

ce type de végétation. Sur le secteur de la Réserve Naturelle du Val de Loire, la surface occupée par la végétation arborée est passée de 39 % en 1960 à 55 % en 2002 (Grivel, 2008). Cela attestant la tendance de stabilité du couvert végétal et par conséquent des formes insulaires.

Nous avons effectué (sur nos sites d'études) une typologie simplifiée de l'évolution du couvert végétal en séparant ce dernier en deux catégories : végétation arborée et végétation en cours de développement (séquences pionnières). Cette analyse n'a pas pour objectifs d'effectuer une typologie détaillée du couvert végétal mais de déterminer le degré de stabilité des formes végétalisées. Ces informations nous semblent nécessaires pour mener à bien une éventuelle opération de restauration du milieu rivulaire.

La végétation arborée s'est étendue de façon considérable au sein des trois sites d'étude. On enregistre pour la période d'étude (1850 – 2005) une croissance de 44 % à Mesves, 40 % à La Charité et 22 % à Guilly. Cette croissance est toutefois influencée par des phénomènes locaux. Dans le secteur de Mesves, la migration latérale du chenal principal a engendré la disparition d'une île boisée en rive gauche (île n°1, figure 30), cela a eu pour conséquence la diminution de la surface du bois dur.

Dans le secteur de la Charité, le basculement de la ligne de talweg n'a pas eu le même effet sur la forêt (à bois tendre et dur) occupant essentiellement les îles. Ces formes insulaires sont situées en rive gauche, donc à l'abri de l'érosion engendrée par le déplacement du chenal principal et qui concerne la rive droite. Ce mode d'évolution peut être mis en relation avec la présence de la Chevrette en amont de ce site, cet ouvrage favorise la sédimentation et le développement de la végétation en rive gauche.

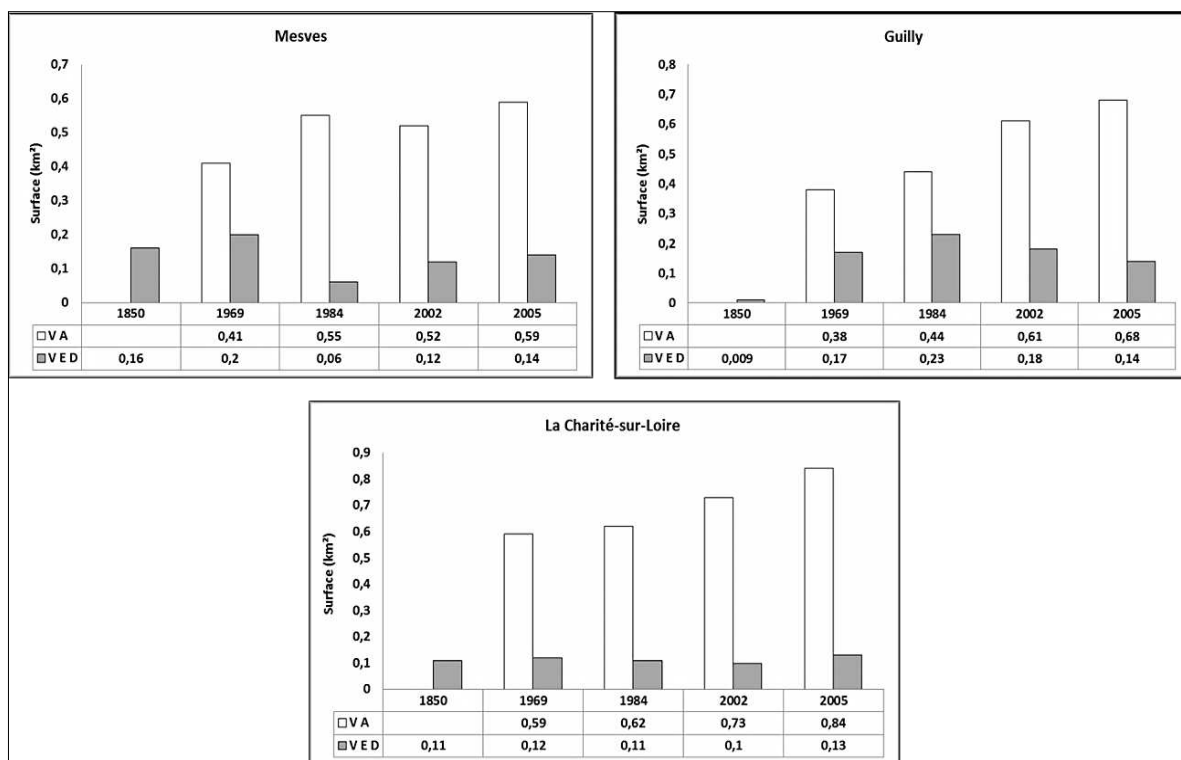


Figure 122. Modalités de l'évolution spatiale du couvert végétal dans les trois sites ateliers. VA : végétation arborée, VED : végétation en cours de développement.

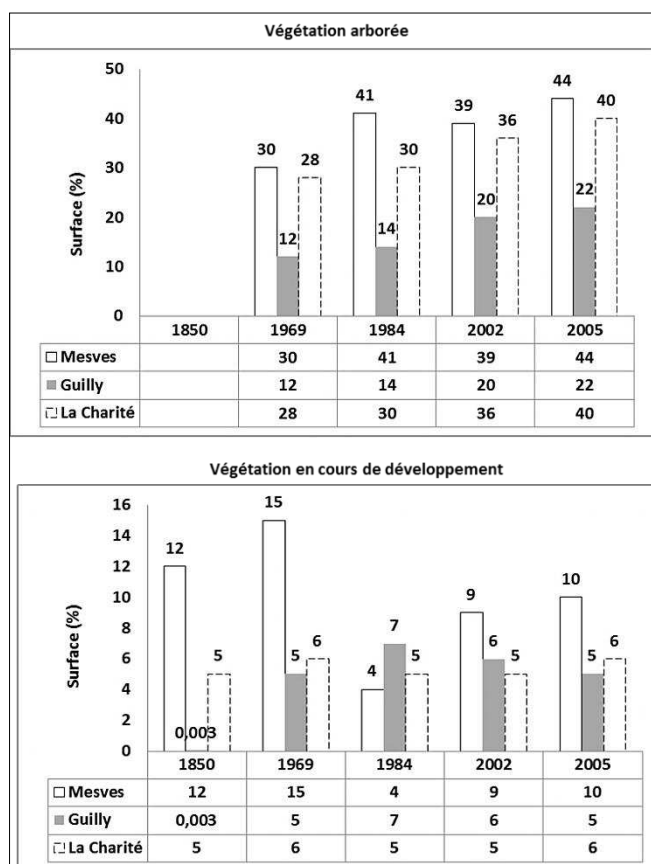


Figure 123. Rythme d'évolution spatiale du bois dur et des séquences végétales en cours de développement.

Le développement de la végétation arborée est un indicateur de la stabilité des formes fluviales (île et franc-bord). L'enfoncement du plancher alluvial et la réduction des durées de submersion sont aussi des éléments qui favorisent cette stabilité des formes à travers l'extension de la forêt à bois dur. Nous avons effectué un rapprochement du mode d'évolutions du couvert végétal (dans son contexte hydrosédimentaire) avec le modèle d'évolution des groupements végétaux dans les corridors fluviaux développé en 1996 par **Pautou** et **Ruffinoni** (*in Piégay et al., 2003*) ; ces auteurs tiennent en compte les processus biologique et les modalités de rajeunissement du couvert végétal et le contexte d'évolution morpho-sédimentaire. Ce modèle distingue la forêt à bois dur de la forêt à bois tendre en fonction de la capacité d'évolution du milieu rivulaire. L'évolution réversible concerne les bois tendres. Ces derniers sont soumis (en fonction de la dynamique fluviale) à des rajeunissements répétés. La stabilité de ces milieux est relativement faible. Les milieux colonisés par les bois durs présentent une forte stabilité, la tendance d'évolution de ces espaces (associé au phénomène d'incision du plancher alluvial) est irréversible. Les communautés de bois durs sont rarement affectées par les perturbations.

Selon ce modèle, la tendance d'évolution de nos sites d'études se rapproche plus du mode d'évolution irréversible décrit dans ce modèle : incision du lit (à un rythme variant entre 3 à 8 cm), développement de forêt à bois dur et exhaussement des bras secondaires. Ce constat met en évidence la nécessité d'établir un programme visant la restauration de ces milieux à travers l'ouverture des bras secondaires et la maîtrise de l'évolution spatiale du couvert végétal (figure 124).

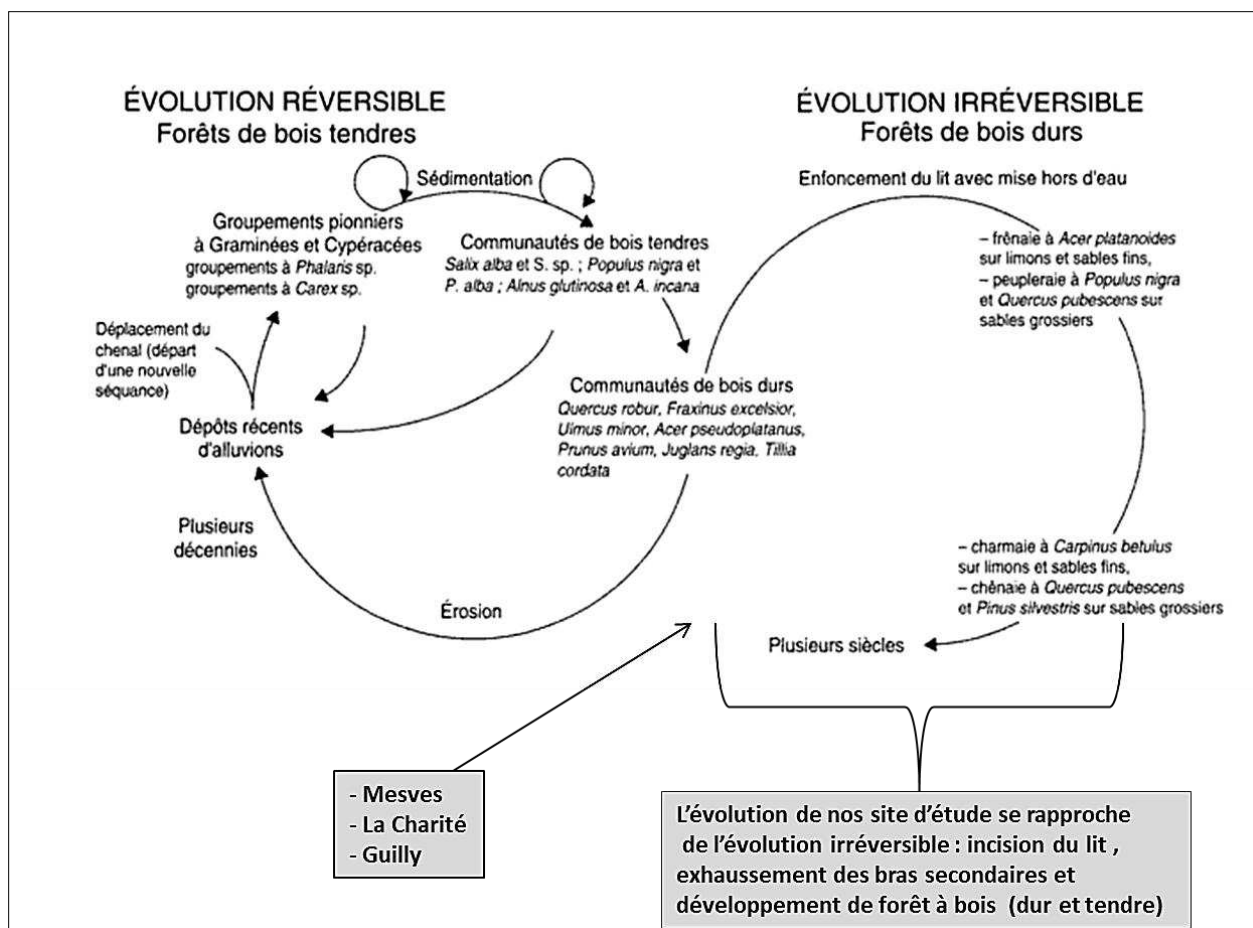


Figure 124. Rapprochement du mode d'évolution des sites ateliers avec le modèle de Pautou et Ruffinoni (1996).

Des îles qui se développent en longueur : l'évolution de la géométrie de ces formes insulaires se caractérise par une extension des extrémités amont et aval, ce qui leur donne une forme allongée. Le rapport « longueur /largeur » varie globalement de 3 à 9 pourquoi cette variabilité (les valeurs les plus importantes de ce rapport sont enregistrées au sein du site atelier de Guilly, soit 9,52). Les séquences pionnières formées au niveau des extrémités des îles engendrent (au fil du temps) leur extension spatiale. Ce mode d'évolution prédomine dans les trois sites que nous avons étudiés.

On constate d'après ces résultats l'existence de zones préférentielles de sédimentation au niveau des extrémités amont et aval des îles (l'extension spatiale de ces îles se fait souvent par allongement de leurs extrémités aval). Ces secteurs correspondent aux connexions amont et aval des chenaux secondaires, ils représentent des zones de « contrôle » de la dynamique morpho-sédimentaire de ces annexes d'écoulements. Les travaux de

dévégétalisation doivent être réalisés en priorité dans ces secteurs afin de limiter l'extension spatiale des îles et assuré la pérennité des bras secondaires.

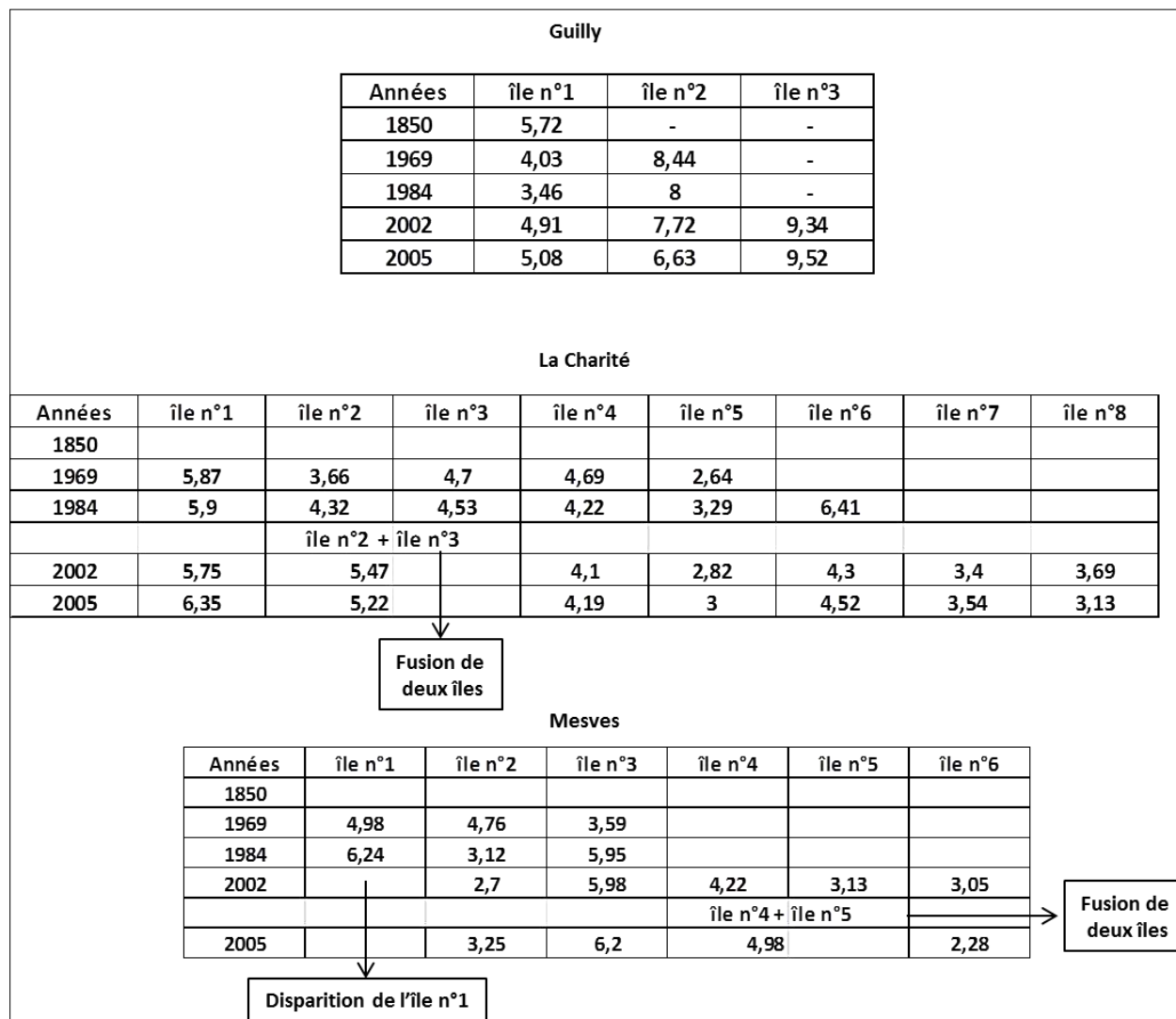


Figure 125. Évolution du rapport « longueur/ largeur » des îles dans les trois sites ateliers. *Les îles ont une forme allongée et se développent essentiellement par fusion avec des séquences pionnières formées au niveau de leurs extrémités. Un seul cas d'évolution par fusion de deux îles est enregistré sur le site de Mesves et dans La Charité.*

2.3 La réduction de l'intensité et de la fréquence des événements hydrologique

Comme le soulignent **Piégay et al.(2003)** : « *les cours d'eau sont caractérisés par une certaine respiration de leurs bandes actives régie par la répartition dans le temps des pics de crue. ce phénomène, qui s'exprime dans des conditions naturelles, est généralement modéré par rapport à ceux exacerbés par les actions humaines* ».

Les crues peuvent engendrer un élargissement de la bande active ou bien un rétrécissement « temporaire » de cette dernière suite à des dépôts de sédiments. La charge

solide déposée est évacuée à l'occasion d'une autre crue (de plus forte intensité), il s'agit donc d'un stockage temporaire de sédiments (**Piégay et Salvador, 1997**). Sur la Loire la situation paraît différente, la bande active a connu une importante réduction depuis plus d'un siècle au profit des surfaces végétalisées. Cette tendance est en partie soutenue par l'affaiblissement de l'intensité et la fréquence des crues. Il existe une relation entre le développement de la végétation et la modification des conditions hydrologiques, **Hupp et Osterkamp (1994)**, notent que la répartition des espèces végétales dans les rivières régies par un climat humide est largement contrôlée par la fréquence, la durée et l'intensité des inondations.

Le travail de synthèse des événements hydrologiques importants, réalisé sur la Loire par **Gautier et Castanet (2008)**, confirme la persistance d'une période hydrologique calme. En s'appuyant sur ces données, nous avons effectué une analyse des événements hydrologiques importants (crues biennale à centennale) en fonction des périodes de changement du style fluvial que nous avons constaté lors de l'analyse au moyen des cartes et des photographies aériennes. Nous avons retenu deux périodes, la première concerne la phase où la Loire développait un style fluvial à chenal large 1850 – 1957. La seconde période regroupe les deux phases d'évolution du style fluvial « multi-chenaux large et début de chenalisation en 2002 » elle concerne la période 1957 – 2005 (Nous avons regroupé ces deux périodes en raison de la courte durée de l'analyse de la phase de chenalisation du lit 2002 – 2005). Les résultats obtenus mettent en évidence **un affaiblissement de l'activité hydrologique de la Loire en raison de réduction de l'intensité et de la fréquence des crues**. On relève au cours de la période d'étude 1850 – 2005 la disparition des crues dont le débit dépasse $7000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (crue de récurrence centennale) depuis 1866, la disparition des crues dont le débit avoisinant $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ depuis 1907 (crue de récurrence cinquantennale) et une réduction de la fréquence des crues de récurrence vicennales, décennale ($3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), quinquennale ($2600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) et biennales ($1800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) au cours de la période 1957 – 2005 (figure).

L'assoupissement hydrologique qu'a connu la Loire a provoqué un affaiblissement de la dynamique fluviale. Cela favorise le développement et la stabilisation de la végétation au

sein des îles et franc-bord (et potentiellement dans les bras secondaires). Cela a engendré la fermeture du système alluvial à travers la rétraction de la bande active (Gautier et al, 2001 ; Gautier et Grivel, 2003 ; Grivel, 2008). Le phénomène de fermeture du paysage fluvial par envahissement de la ripisylve a été observé par Fagot et al (1989) sur l'Ain, les auteurs attribuent cette métamorphose récente (1954 - 1983) à des modifications de régime des débits. Un autre évènement hydrologique semble être un important facteur dans l'évolution morphodynamique du lit mineur. Il s'agit de la disparition des hautes eaux d'été depuis 1925 (Gautier et Castanet, 2008). Cette période correspond aussi à celle du développement rapide de la végétation au sein du lit. En effet, les basses eaux d'été favorisent le développement de la végétation au sein des bras secondaires et par conséquent la perturbation du transit sédimentaire (piégeage de sédiments). Cette période de l'année est propice au développement de peupliers et des saules qui aujourd'hui progressent à une vitesse considérable au détriment de la bande active.

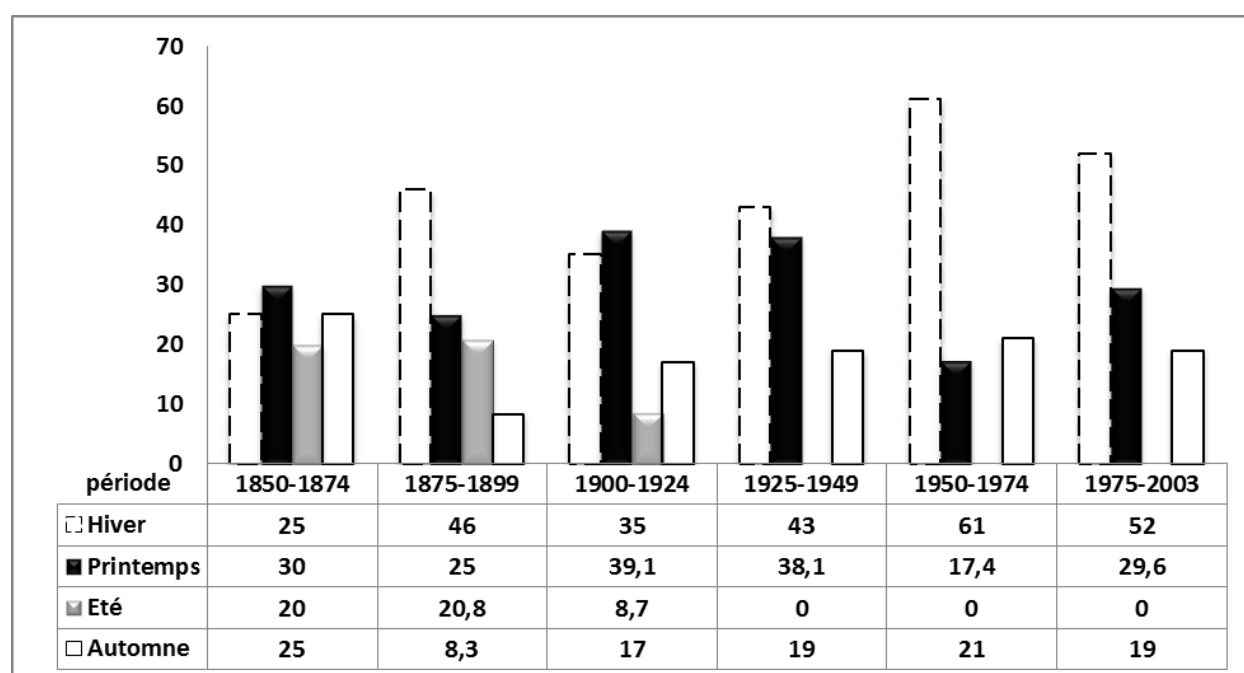


Figure 126. Evolution des hautes eaux saisonnières depuis 1850, station de Givry (d'après Gautier, 2008).

On constate la disparition des hautes eaux d'été depuis 1925, ce changement hydrologique favorise la prolifération des séquences pionnières « type saule et peuplier » au sein des bras secondaires et des bancs mis hors d'eau pendant la saison estivale.

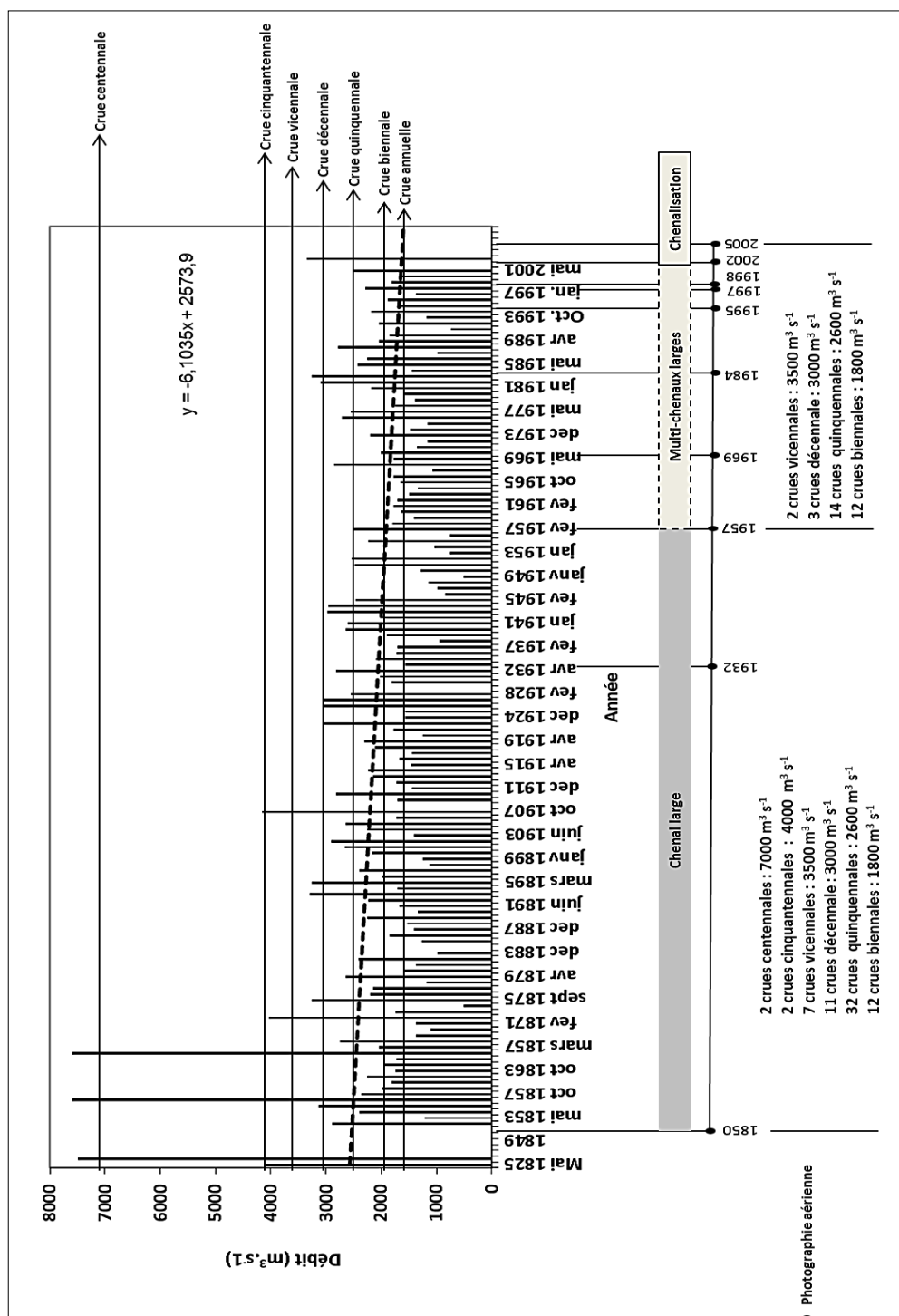


Figure 126. Chronique des crues survenues entre 1825 et 2002, stations de Givry (source Gautier, 2008, modifiée).

On constate d'après ces résultats un affaiblissement de l'activité hydrologique de la Loire. Les crues peuvent être extrêmement importantes $7000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Les débits journaliers calculés de crue biennale et quinquennale valent respectivement 1700 et $2300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Le débit journalier calculé de crue décennale est de $2700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, pour la crue de récurrence vicennale il est de $3100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, tandis que pour la crue cinquanteennale il est de $3600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Conclusion

La transformation de la morphologie du lit de la Loire est une réponse à de nombreux facteurs d'origines naturelle et anthropique : extraction de granulats, endiguement, réduction de l'intensité et la fréquence des crues, modification de l'occupation des sols et l'arrêt de l'entretien du lit. Il est difficile de savoir dans quelle mesure interviennent l'évolution naturelle et l'altération anthropique de l'espace fluvial en raison de la complexité de l'évolution géomorphologique du fleuve et la diversité du fonctionnement des écosystèmes aquatiques et terrestres (Bomer 1972, Piégay et Landon 1994, Gautier et Bazin 1996, Gautier et al 2000, 2001, 2003, Burnouf et al 2001, Larue 2002). La modification de l'hydrosystème ligérien s'est produite à deux échelles : celle du bassin versant influençant les variables externes (débit solide et liquide) et à l'échelle du tronçon agissant sur les variables internes (géométrie du lit, pente...). Les relations endiguement-incision (Brooks 1988, Grivel 2008) et extractions-incision (Gazowski 1994, Gilard 1992, Reich 1994) sont clairement démontrées. Sur le Buëch, (Gautier, 1994) met en évidence le rôle déterminant des extractions de granulats dans la rapidité et l'ampleur des processus d'incision du plancher alluvial.

La Loire souffre aujourd'hui de deux problèmes chroniques : **l'incision du lit et l'extension rapide du couvert végétal, deux phénomènes étroitement liés**. Le changement du style fluvial est en grande partie lié au développement de la végétation (la formation des îles). L'extension de la bande végétalisée et la stabilisation des îles résultent de la migration latérale du chenal principal (talweg) et surtout de l'incision de ce dernier. On peut penser que la position latérale des îles est le résultat de la migration du talweg (Grivel, 2012) et **leurs stabilité résulte de l'incision du lit et de l'affaiblissement de la dynamique hydrologique** : Le transit de la charge du fond a été fortement perturbé, ce déséquilibre sédimentaire est à l'origine de l'enfoncement du plancher alluvial. L'abaissement de la ligne d'eau au sein du chenal principal favorise l'extension de la végétation à travers la réduction des durées de submersions des bras secondaires, des îles et un moindre remaniement des bancs.

Le développement du couvert végétal au sein du lit mineur se fait au détriment de la bande active. Il en résulte une réduction de la section mouillée. Cela favorise la concentration des eaux dans un chenal étroit, l'augmentation des forces tractrices et l'accélération des processus d'incision au sein du lit.

On constate par ailleurs que la présence des ouvrages fluviaux favorise la création de zones préférentielles de sédimentation au sein du lit, la présence de la chevrette de La Charité favorise le stockage de sédiment dans le bras de la rive gauche.

Dans le site de Guilly, l'accumulation des sédiments s'effectue essentiellement à l'aval des seuils durs (artificiels dans la majorité des cas), la position médiane des îles au sein du lit est à mettre en relation avec la présence d'enrochement situé en amont de ces formes insulaires. Enfin, la présence des levées limite la « respiration » de la bande active.

La Loire a connu des modifications importantes au cours des deux derniers siècles, ces altérations se traduisent par une diminution de la bande active, l'incision du chenal principal, l'exhaussement et le comblement des bras secondaires et un développement rapide de la végétation. Cela constitue un problème majeur aux yeux des gestionnaires et des chercheurs. La revalorisation récente de ces milieux est due aux progrès des connaissances dans le domaine de la géomorphologie et de l'écologie et la mise en œuvre de programmes de recherches interdisciplinaires dans lesquels s'inscrit la présente thèse.

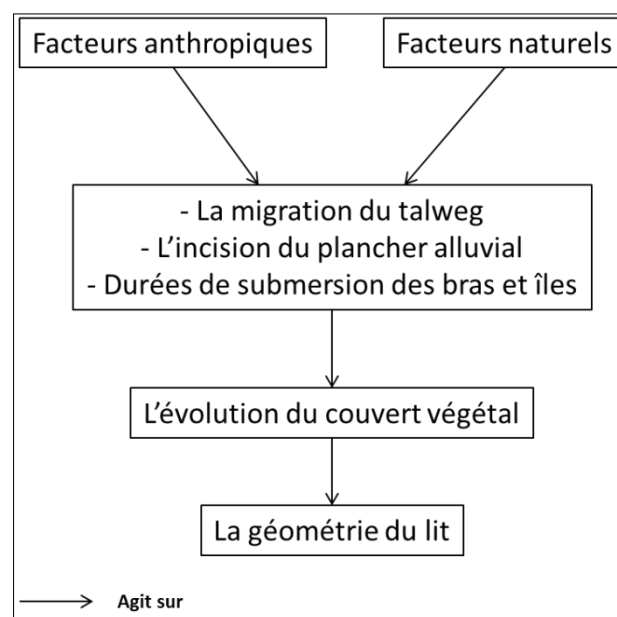


Figure 127. Hiérarchie des éléments agissant sur la dynamique morpho-sédimentaire de nos secteurs d'étude (Inspiré de Piégay et *al.*, 2003).

Deuxième Partie

Chapitre 5. Analyse du bilan sédimentaire de la bande active, approche à grande échelle spatiale.

On aborde dans ce chapitre l'analyse de l'évolution du transit sédimentaire au sein de la bande active. L'objectif est d'établir un budget sédimentaire à fin de déterminer : l'évolution topographique du plancher alluvial et des bras secondaires, ensuite l'impact des aménagements (Chevrette et autres seuil artificiels) sur le transit sédimentaire et enfin l'impact des différents travaux de restauration réalisés essentiellement dans les chenaux secondaires. Ces interventions sont réalisées afin favoriser le transit sédimentaire vers le chenal principal et d'abaisser la lame d'eau en période de crue. Les conditions hydrologiques du fleuve et leur influence sur le transport solide sont également prises en compte.

Analyse topographique et calcul du budget sédimentaire

Le paysage fluvial de la Loire est constitué d'une mosaïque hétérogène regroupant des mésoformes (île, bras, banc ...), des groupements végétaux et des aménagements. L'évolution de ces éléments et leurs emprises spatiales influencent la dynamique fluviale en agissant sur les processus d'ajustement du cours d'eau (variables de contrôles). Ce dernier adapte les formes en fonction de l'interaction entre ces éléments et leurs évolutions dans l'espace et le temps. De ce fait, l'analyse du fonctionnement de ce système fluvial est très complexe. Elle doit associer une dynamique fluviale, végétale et sociale. La seconde difficulté réside dans le caractère local des conditions du cours d'eau, l'analyse d'un tronçon du fleuve est conditionnée par des données locales comme par la dynamique d'ensemble. Cela fait appel à l'utilisation d'outils et de méthodes expérimentaux adaptés aux sites étudiés.

1.1 Évolution topographique de la bande active

a. Site atelier de la Charité-sur-Loire

Ce site est un bon exemple de la Loire aménagée évoluant sous une pression anthropique. Les sociétés riveraines ont introduit à travers l'édification de digue, pont et chevette des éléments nouveaux agissants de façon continue sur les paramètres physiques du fleuve (pente largeur et profil en long). Ces paramètres de réponse sont très sensibles aux perturbations des débits solides et liquides.

a.1 Le chenal principal

Influence des aménagements et des événements hydrologiques sur la morphologie du plancher alluvial

La modélisation topographique de la bande active nous a permis mettre en relation la répartition spatiale du stock sédimentaire et le positionnement des aménagements au sein du lit mineur : les zones les plus profondes du lit longent les aménagements conçus de façon parallèle au tracé du lit (digue, quai et chevette). Quant aux zones de dépôts, on les retrouve au droit de ces ouvrages sur les marges des îles et franc-bord. Ces aménagements exercent donc une influence sur l'évolution morphodynamique du bras principal en

modifiant son profil en travers (modification de la topographie du fond et réduction de la largeur du chenal). « Le profil en travers est l'un des degrés de liberté du chenal » (**Bravard et Petit. 1999**)

La largeur du lit est aussi influencée par la présence des levées. Dans le cas du site d'étude, les levées ont un double effet sur la forme du lit : l'augmentation de la résistance des berges aux forces d'érosion (réduction des apports solide) et le rehaussement de la valeur du débit de débordement. Ce rehaussement de la ligne d'eau de débordement représente un flux liquide supplémentaire favorisant l'incision du fond du lit (augmentation des forces tractrices) et la fragilisation des levées. Le débit de plein bord est de l'ordre de 900 m³/s alors que le débit de débordement avoisine 2000 m³/s en raison de la présence des digues.

L'autre élément à prendre en compte est l'évolution longitudinale du plancher alluvial qui : reflète la capacité de transport, le calibre de la charge et renseigne sur le degré de l'équilibre morphosédimentaire (**Bravard et Petit. 1999**). De ce fait, la présence d'un seuil dur (radier) au niveau du pont de la Charité influence la régularité du profil en long en le décomposant en deux segments. Cela peut avoir des incidences sur la topographie du fond. S'ajoute à ces éléments de perturbation les conséquences de l'extraction massive de granulat qui a duré plus de 40 années (voir chapitre précédent). Les prélèvements de sédiments effectués au sein du lit mineur favorisent le déficit sédimentaire et par conséquent l'abaissement du plancher alluvial.

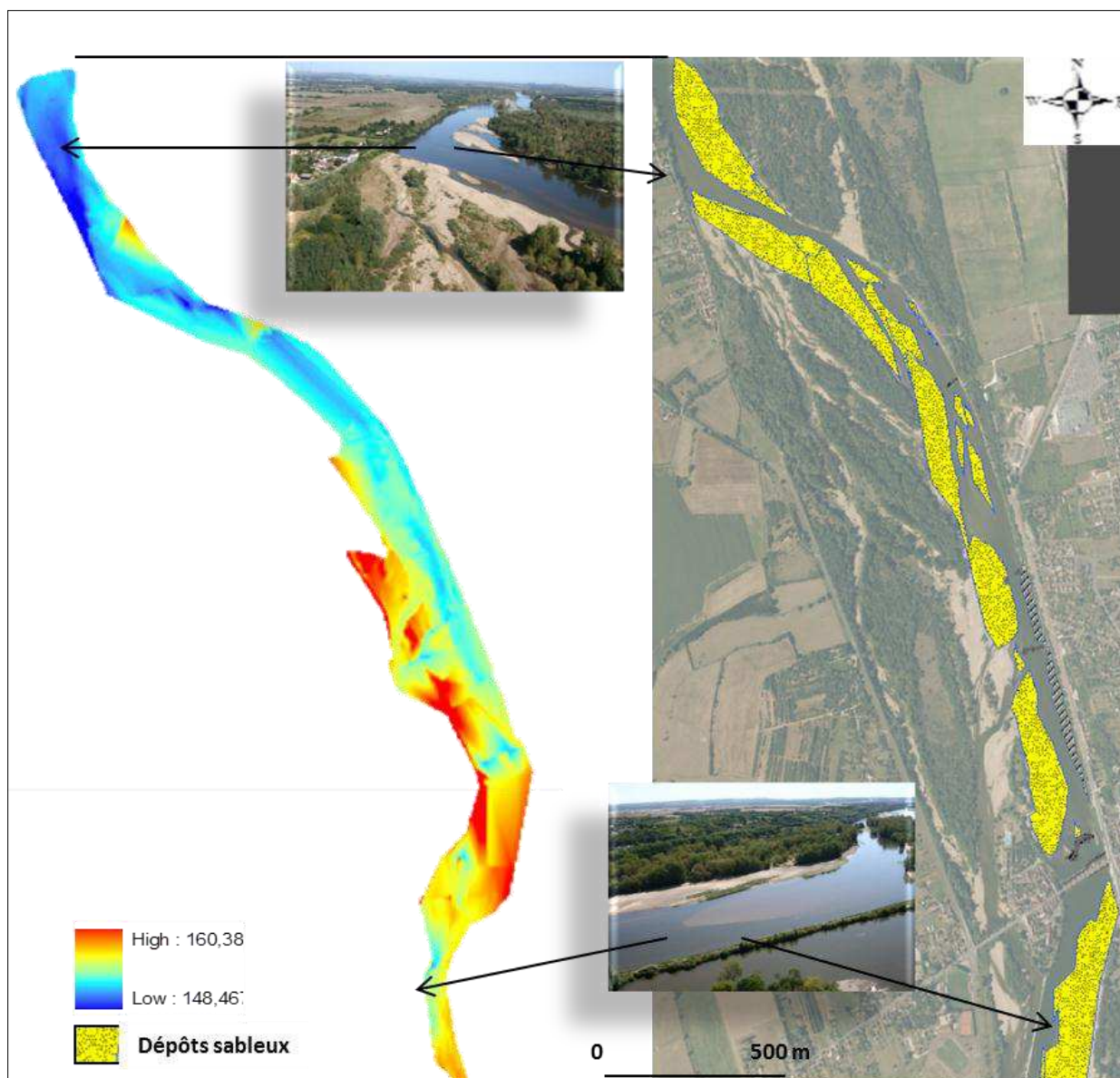


Figure 728. Site atelier de la Charité-sur-Loire : répartition spatial des bancs de sables et des mouilles dans le chenal principal.

Comparaison entre le MNT (bathymétrie DREAL 2005) et les levés de terrain (2008).

Analyse des profils transversaux

L'analyse diachronique des profils topographiques est réalisée sur un pas de temps de 6 ans (2005 – 2011). Nous avons pris en compte seulement les profils effectués aux mêmes endroits, les profils décalés n'ont pas été pris en compte, pour cette raison nous avons pu comparer dans certains cas seulement deux profils. Cette analyse tient également compte des conditions hydrologiques (crue de novembre 2008) et de l'influence des différents

ouvrages artificiels (pont, chevette et seuils durs) sur l'évolution topographique du plancher alluvial. Pour faciliter l'analyse, nous avons réparti le site en trois secteurs :

La partie amont

Les profils n° 1 à 4 ont été réalisés en amont du pont de La Charité au niveau de la connexion de la Loire avec le bras secondaires de la rive gauche. Ces deux bras sont séparés par la chevette. Cet ouvrage représente un obstacle à l'écoulement et favorise la formation d'écoulement turbulent (au niveau de la brèche et à proximité de l'ouvrage). Les zones les plus profondes se trouvent en rive gauche au niveau de la chevette. L'analyse de l'évolution verticale du plancher alluvial met en évidence l'impact morphogène de la crue de novembre 2008, on constate un rehaussement du fond et un lissage des profils en travers en 2009 (transects 1 à 4 réalisés dans le chenal principal). La tendance d'évolution topographique constatée en 2011 est en faveur de l'incision. Le rythme annuel de sédimentation du lit varie entre 7 et 25 cm. Le rythme annuel d'incision oscille entre 8 et 25 cm. On constate, selon les résultats de la dernière campagne de mesure (2011), que les secteurs concernés par l'incision du plancher alluvial sont les plus étendus.

Tableau 18. Figure 6. Caractéristique de l'évolution des profils topographique transversaux réalisés dans le chenal principal au niveau de la partie amont (2008 -2011, transects 1 à 4)

	Longueur en mètres	Années de suivi	Bilan sédimentation	Bilan érosion	Tendance majeure
Transect 1	152	2009 et 2011	Extrémités gauche et droite (25 cm/an)	¼ du profil (sur 119 m environ)	Incision (14cm/an)
Transect 2	130	2008, 2009 et 2011	- Formation d'une zone de sédimentation de 21 m en partie droite du profil à un rythme de 9,6 cm/an - Sédimentation pouvant atteindre 30 cm/an	- Erosion active de 8,3 à 42 cm et à un rythme allant de 8,3 à 21 cm/an de la rive gauche vers le centre du profil.	Forte dynamique fluviale alternant des phases d'érosion et de sédimentation
Transect 3	94	2008, 2009 et 2011	un secteur d'accumulation sur environ 40 m en rive gauche, 11,6 cm/an	- Un secteur d'érosion étalé sur 45 m en rive droite, 8,7 cm/an	rehaussement du fond du lit d'une valeur moyenne de 34 cm entre 2008 et 2009
Transect 4	163	2005, 2008, 2009 et 2011	2005-2009 - rythme de 13,5 cm/an et une valeur maximale de 1,12 m. 2008-2009 - rehaussement d'une valeur moyenne de 19,4 cm	2005-2011 - rythme annuel de 16,4 cm. - abaissement avec une valeur maximale de 61 cm en rive gauche	- rehaussement du plancher alluvial sur l'ensemble du transect en 2009 - L'incision prend le dessus sur tout le transect en 2011

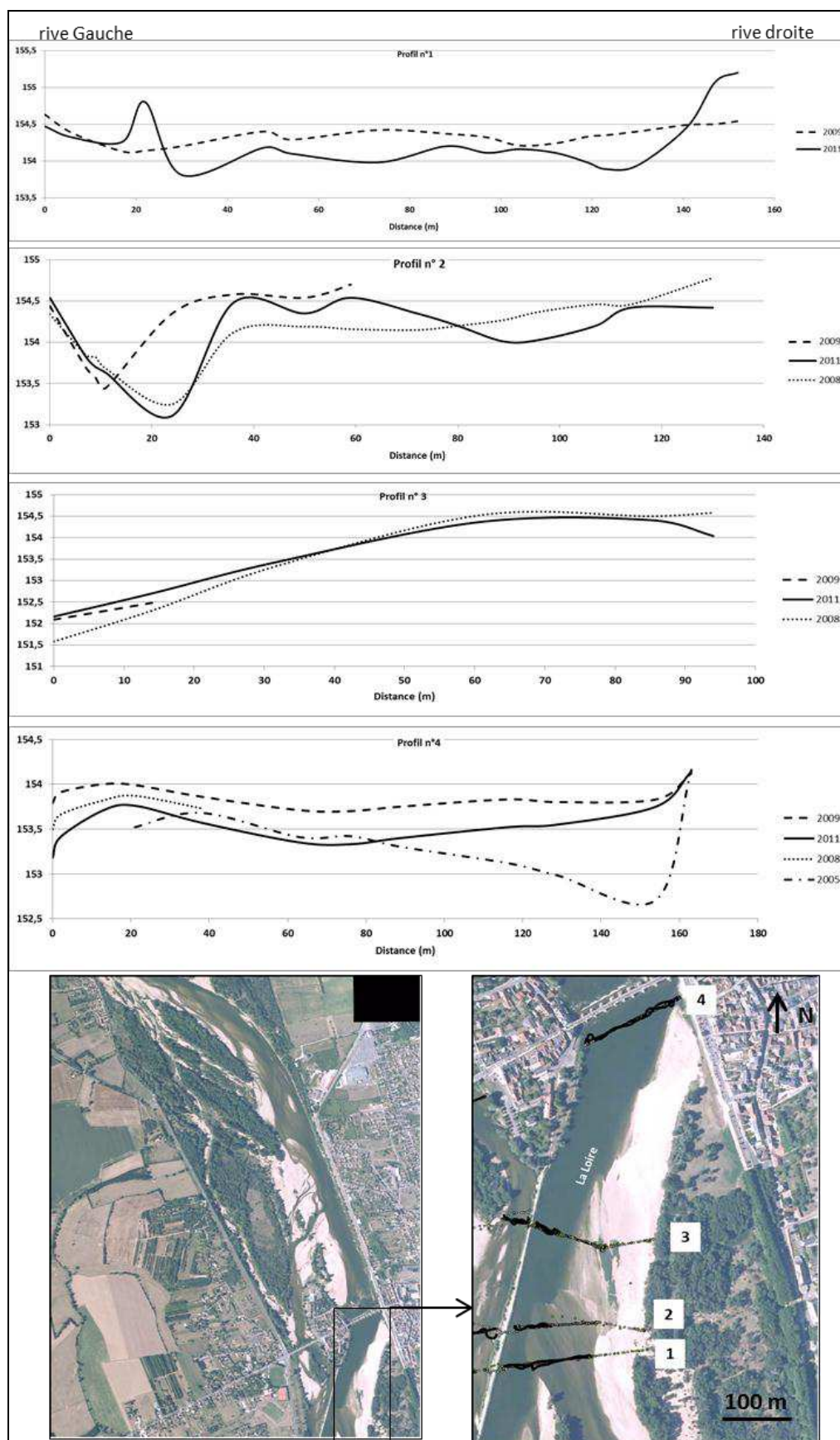


Figure 129. Localisation et évolution des profils transversaux dans la zone amont, profils 1 à 4 (2005 – 2011).

La partie médiane

Les profils 5 à 8 ont été réalisés sur un tronçon allant du pont de La Charité jusqu'à la connexion aval de la Loire avec le bras secondaire de la rive gauche. Ces profils sont distancés de 60 m. la tendance générale de l'évolution topographique de ce secteur est le rehaussement du plancher alluvial en 2009 et la reprise du travail érosif du cours d'eau en 2011. Les zones les plus profondes se situent essentiellement en rive droite. Le rythme annuel de sédimentation du lit varie entre 4,2 et 15 cm. Le rythme annuel d'incision oscille entre 2,5 et 22 cm. On constate, selon les résultats de la dernière campagne de mesure (2011), que les secteurs concernés par l'incision du plancher alluvial sont les plus étendus.

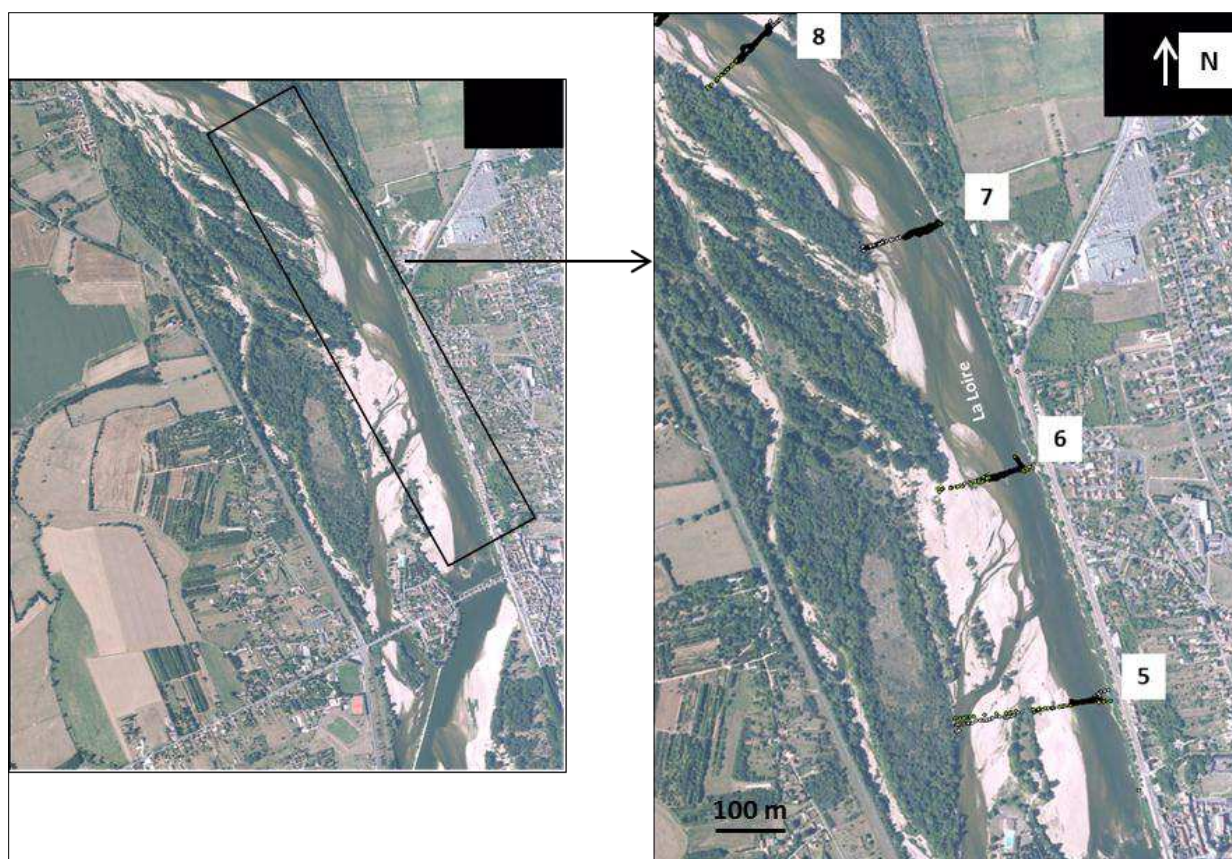


Figure 130. Localisation des profils transversaux dans la zone médiane (2005 – 2011)

Tableau 19. Caractéristique de l'évolution des profils topographique transversaux réalisés dans le chenal principal au niveau de la partie médiane (2008 -2011, transects 5 à 8)

	Longueur en mètres	Années de suivi	Bilan sédimentation	Bilan érosion	Tendance majeure
Transect 5	61	2005, 2009 et 2011	2005-2009 : 10,5 cm/an et une valeur maximale de 62 cm (en rive droite)	L'incision reprend le dessus sur tout le profil en 2011 à un rythme de 21,7 cm/an.	rehaussement du plancher alluvial sur l'ensemble du transect en 2009
Transect 6	66	2005 et 2008	migration latérale de la zone d'accumulation (de la rive gauche vers le milieu du chenal) rythme annuel de 7,4 cm	formation de deux zones d'érosion sur les marges latérale du profil rythmes annuels respectifs de 9,3 cm (rive gauche) et 2,5 cm (rive droite)	
Transect 6 bis	66	2005, 2009 et 2011	5,4 cm/an	15,6 cm/an formation de mouille en rive droite	Incision
Transect 7	144	2005 et 2008	rehaussement du talweg (5 cm) un dépôt de sédiment en rive droite sur 54 m 10,2 cm/an	érosion en rive gauche sur 90 m 7 cm/an	
Transect 7 bis	144	2005, 2009 et 2011	La zone de sédimentation concerne une partie d'environ 30 m en rive gauche à un rythme de 4,25 cm/an. - Rythme moyen de 11,2 cm/an (entre 2005 et 2009)	En 2011 - incision à un rythme de 11,9 cm/an	rehaussement du fond du lit sur l'ensemble du profil et une migration du talweg vers la rive gauche en 2009 et un abaissement du plancher alluvial en 2011
Transect 8	137	2008, 2009 et 2011	2009 : - rehaussement du fond du lit sur la majeure partie du profil (environ 90 m) A un rythme de 15 cm/an	- 2008-2009 : - migration latérale du talweg vers la rive gauche (sur 54 m) 2009-2011 : - migration du talweg vers la rive droite (déplacement sur 89 m et perte de 31 cm par rapport à 2008) - abaissement du fond à un rythme de 22,1 cm/an	Incision

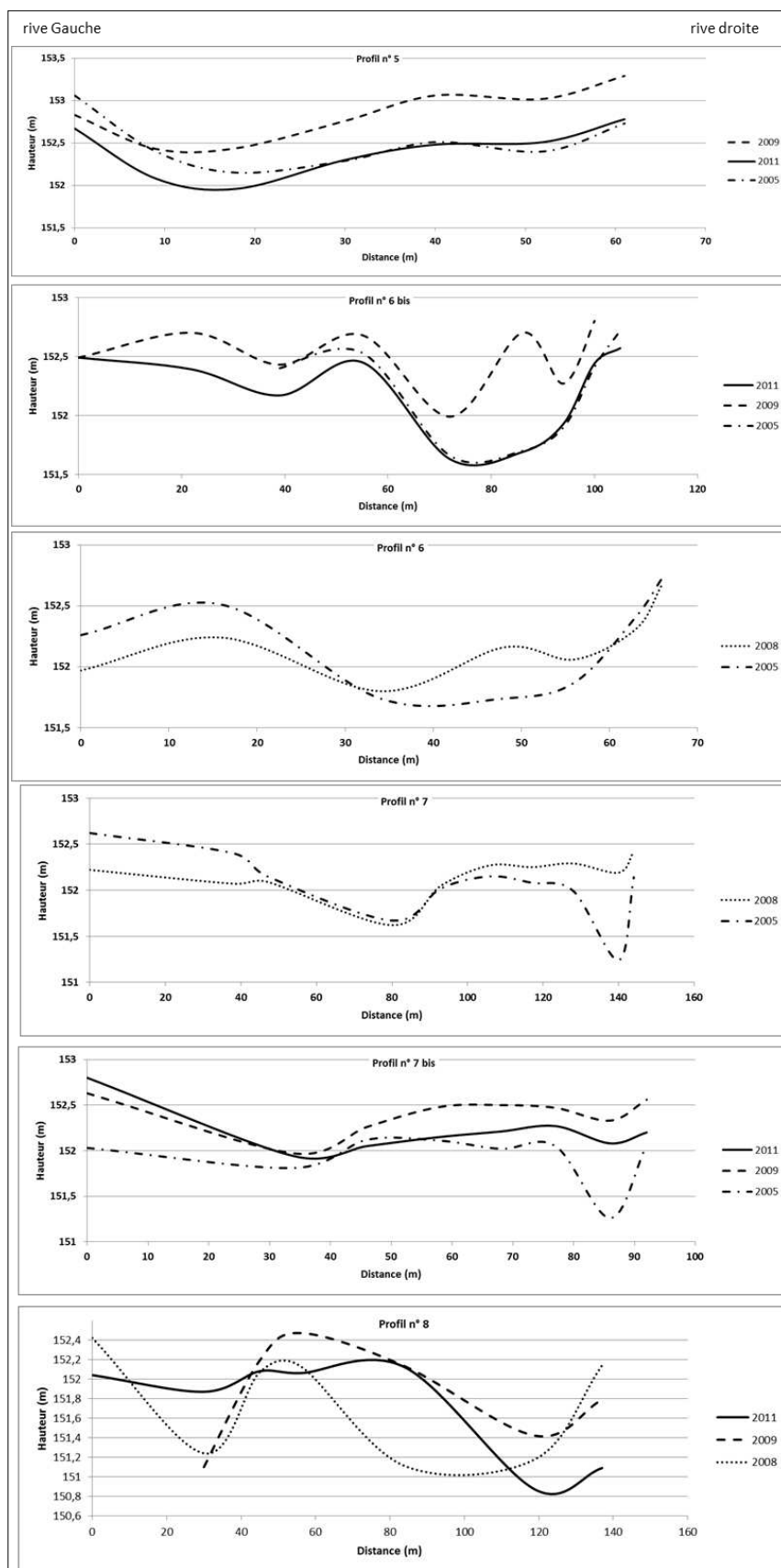


Figure 131. Évolution des profils transversaux dans la zone médiane, profils 5 à 8 (2005 – 2011).

La partie aval

Les profils 9 à 17 ont été réalisés au niveau de la connexion aval de la Loire avec le bras secondaire de la rive gauche, sur un tronçon d'environ 130 m. ce secteur se caractérise par la présence de la levée en rive gauche et un rétrécissement du chenal principal en raison de la présence d'une île en rive droite. La même tendance d'évolution est constaté pour les transects n° 9 à 17 : un rehaussement du fond du lit et migration latérale du talweg en 2009 et un inversement de tendance en 2011, on note pour cette année une reprise de l'activité érosive engendrant un abaissement du lit. Cette incision atteint dans certains cas des niveaux topographique inférieurs à ceux de 2005 et 2008. Le rythme annuel de sédimentation du lit varie entre 4,3 et 50 cm. Le rythme annuel d'incision oscille entre des valeurs allant de 5 à 50 cm. On remarque, d'après les résultats de la dernière campagne de mesure (2011), que les secteurs concernés par l'incision du plancher alluvial sont les plus étendus.

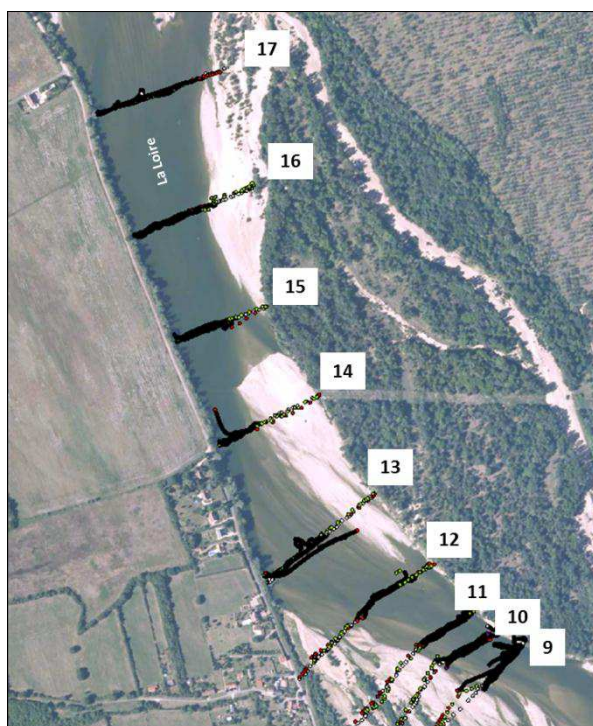


Figure 182. Localisation des profils transversaux dans la zone aval

Tableau 20. Caractéristique de l'évolution des profils topographique transversaux réalisés dans le chenal principal au niveau de la partie aval (2008 -2011, transects 9 à 13)

	Longueur en mètres	Années de suivi	Bilan sédimentation	Bilan érosion	Tendance majeure
Transect 9	92	2008, 2009 et 2011	2008 – 2009 : rehaussement d'une valeur moyenne de 53,8 cm sur la majeure partie du profil (82 m)	2008 – 2009 : migration latérale du talweg vers la rive gauche (66 m), abaissement de 5 cm sur 10 m. 2009 – 2011 : - enfoncement à un rythme de 16,1 cm/an - migration du talweg vers la rive droite (44 m).	incision
Transect 10	88	2008, 2009 et 2011	2008 – 2009 : rehaussement d'une valeur moyenne de 39,2 cm (sur 58 m)	2008 – 2009 : migration latérale du talweg vers la gauche (40 m) 2009 – 2011 : - abaissement à un rythme de 11,6 cm/an - migration latérale du talweg vers la rive droite (40 m).	Alternance de zone d'incision et de rehaussement
Transect 11	98	2008, 2009 et 2011	2008 – 2009 : rehaussement d'une valeur moyenne de 38,7 cm (sur 88 m)	2008 – 2009 : abaissement moyen de 27,5 cm en rive gauche (sur 10 m) 2009 – 2011 : - abaissement à un rythme de 24,1 cm/an	incision
Transect 12	170	2008, 2009 et 2011	2008 – 2009 : - lissage et rehaussement de 46,8 cm du fond du lit sur une grande partie du chenal (100 m) 2009 – 2011 : - rehaussement sur les marges latérales du profil (22,5 cm/an en rive gauche et 30 cm/an en rive droite).	2008 – 2009 : - abaissement sur les marges latérales (50 cm/an en rive gauche et 2 cm/an en rive droite). - migration du talweg vers la rive gauche (sur 46 m) 2009 – 2011 : - incision du fond du lit sur une grande partie du profil (100 m), à un rythme de 33,2 cm/an. - migration du talweg vers le milieu du chenal (décalage de 46 m et incision de 32 cm par rapport à 2008). Le chenal tend à reprendre la forme de 2008	incision
Transect 13	174	2009 et 2011		- abaissement à un rythme de 25,6 cm/an	incision

Tableau 21. Caractéristique de l'évolution des profils topographique transversaux réalisés dans le chenal principal au niveau de la partie aval (2008 -2011, transects 14 à 17).

	Longueur en mètres	Années de suivi	Bilan sédimentation	Bilan érosion	Tendance majeure
Transect 14	185	2005, 2008, 2009 et 2011	<p>2008 – 2009 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rehaussement de 1,24m en moyenne sur 30 m en rive gauche <p>2009 – 2011 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - formation d'une zone de sédimentation sur environ 17 m à un rythme annuel de 16,1 cm. - Le chenal tend à reprendre la forme qu'il avait en 2008 	<p>2005 – 2008 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - incision sur 30 m en rive gauche, (38,6 cm/an) <p>2009 – 2011 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - incision sur 30 m en rive gauche (80 cm/an) 	Alternance de zone d'incision et de rehaussement
Transect 15	138	2005, 2008, 2009 et 2011	<p>2005 – 2008 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - accumulation de sédiments en rive droite sur 38 m (41,6 cm/an) <p>2008 – 2009 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rehaussement sur la majeure partie du profil, (110 m) : 1 m/an <p>2009 – 2011 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - accumulation sédimentaire à un rythme de 13 cm/an 	<p>2005 – 2008 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - abaissement du fond du lit (sur 100 m) à un rythme de 9,4 cm/an <p>2008 – 2009 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - incision d'une valeur moyenne de 32,5 cm (sur 18 m) en rive droite - migration latérale du talweg, sur environ 78 m (de la rive gauche vers la rive droite) <p>2009 – 2011 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - abaissement du fond du lit sur la majeure partie du profil (97 m) à un rythme de 27,7 cm/an 	incision
Transect 16	195	2005, 2008, 2009 et 2011	<p>2005 – 2008 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rehaussement à un rythme de 13 cm/an <p>2008 – 2009 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rehaussement d'une valeur moyenne de 60 cm sur l'ensemble du profil <p>2009 – 2011 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - accumulation sédimentaire à un rythme de 13 cm/an 	<p>2009 – 2011 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - abaissement du fond du lit sur la majeure partie du profil, environ 155 m. La valeur moyenne cette incision est de l'ordre de 71,3 cm, soit un rythme de 35,6 cm/an, et une migration latérale du talweg, sur environ 112 m (de la rive gauche vers la rive droite) 	incision
Transect 17	189	2005, 2008, 2009 et 2011	<p>2005 – 2008 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rehaussement à un rythme de 4,4 cm/an <p>2008 – 2009 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rehaussement sur la majeure partie du profil, à un rythme de 47,2 cm <p>2009 – 2011 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - accumulation à un rythme de 4,3 cm/an 	<p>2005 – 2008 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - incision du lit sur 107 m à un rythme de 4,6 cm/an <p>2008 – 2009 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - incision d'une valeur moyenne de 42 cm formée sur 21 m en rive droite. <p>2009 – 2011 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - abaissement du fond du lit sur une grande partie du transect, à un rythme de 17 cm/an - migration latérale du talweg, sur environ 104 m (de la rive gauche vers la rive droite) 	incision

Evolution du profil en long

La comparaison des profils en long relative à la période d'étude (2005 – 2011) montre un rehaussement et une migration latérale de la ligne de talweg sur l'ensemble du site d'étude en 2009. La valeur moyenne de rehaussement est de 70 cm, avec une valeur maximale de 2,7 m, les secteurs de sédimentation les plus importants se situent dans la partie aval. On note pour l'année 2011 un abaissement d'une valeur moyenne de 52 cm sur l'ensemble du profil, soit un rythme annuel de 26 cm. Les valeurs d'incision les plus importantes sont relevées dans la partie aval, soit 1,1 m.

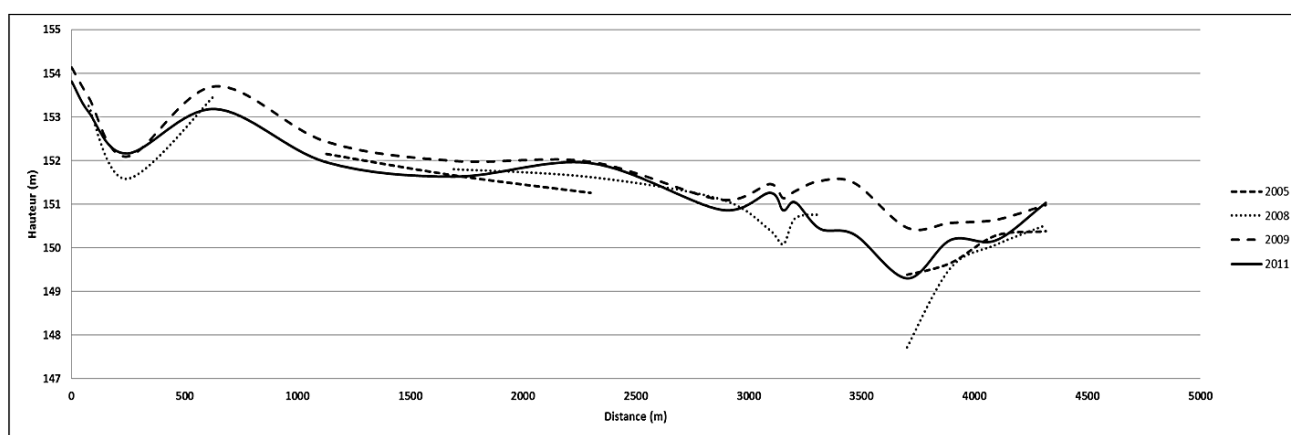


Figure 133. Évolution du profil en long entre 2005 et 2011.

Un rehaussement globale du fond du lit en 2009 et un inversement de tendant en 2011 sur l'ensemble du profil.

L'analyse de l'ensemble des résultats de l'évolution topographique des profils transversaux et le profil en long nous a permis de dégager les conclusions suivantes :

- En 2008 : l'évolution topographique du site est globalement marquée par une alternance de rehaussements et d'incision du plancher alluvial, les secteurs d'incision sont plus étendus que les zones de sédimentation. Les valeurs les plus importantes (de sédimentation et de l'érosion) sont enregistrées au niveau de la partie aval. Les dépôts sédimentaires se forment dans la plus part des cas au niveau des marges du chenal principal. Cela peut favoriser l'extension spatiale des îles et franc-bord.
- En 2009 : en dehors du secteur de la chevette où on a une incision au niveau des mouilles (Transect n°2), l'évolution topographique du fond du lit se caractérise par un

rehaussement du plancher alluvial sur tout le site d'étude, les zones les plus profondes situées dans la partie aval (au niveau de la levée) ont connus un rehaussement qui atteint dans certains cas une valeur supérieure à 1 m. Les zones d'érosion sont globalement situées sur les marges des profils, ce qui défavorise l'extension spatiale des îles et franc-bord. Les valeurs de sédimentation les plus importantes sont enregistrées au niveau de la partie aval.

- En 2011 : un inversement de tendance sur tous les profils étudiés, l'évolution topographique du plancher alluvial se caractérise par un abaissement global avec parfois des valeurs inférieures à ceux relevés en 2008 (aggravation de l'incision). Les valeurs d'incision les plus importantes sont enregistrées au niveau de la partie aval. Les dépôts sédimentaires se forment dans la plupart des cas au niveau des marges du chenal principal.

L'année 2009 semble être une exception à la règle qui régit l'évolution morphosédimentaire du chenal principal. La reprise du travail d'érosion en 2011 (aux mêmes endroits qu'en 2008) laisse penser à la présence de zones préférentielles d'érosion et de dépôts au sein du chenal principal. Cela peut favoriser l'incision du plancher alluvial.

Tableau 22. Synthèse de l'évolution topographique des profils transversaux (2005 – 2011), site atelier de La Charité-sur-Loire)

	année		
Caractéristiques du transect	2008	2009	2011
Longueur totale des zones de sédimentation (m)	236	1461	338
Longueur totale des zones d'érosion (m)	379	149	1638
Taux moyen annuel de sédimentation (m)	0,15	0,46	0,13
Taux moyen annuel d'érosion (m)	0,13	0,24	0,23
LTZS / LTZE	0,62	9,8	0,2
TMAS / TMAE	1,15	1,9	0,5
(LTZS / LTZE) . (TMAS / TMAE)	0,7	18,6	0,1
La tendance	érosion	sédimentation	érosion

LTZS : Longueur totale des zones de sédimentation,

TMAS : Taux moyen annuel de sédimentation,

LTZE : Longueur totale des zones d'érosion.

TMAE : Taux moyen annuel d'érosion.

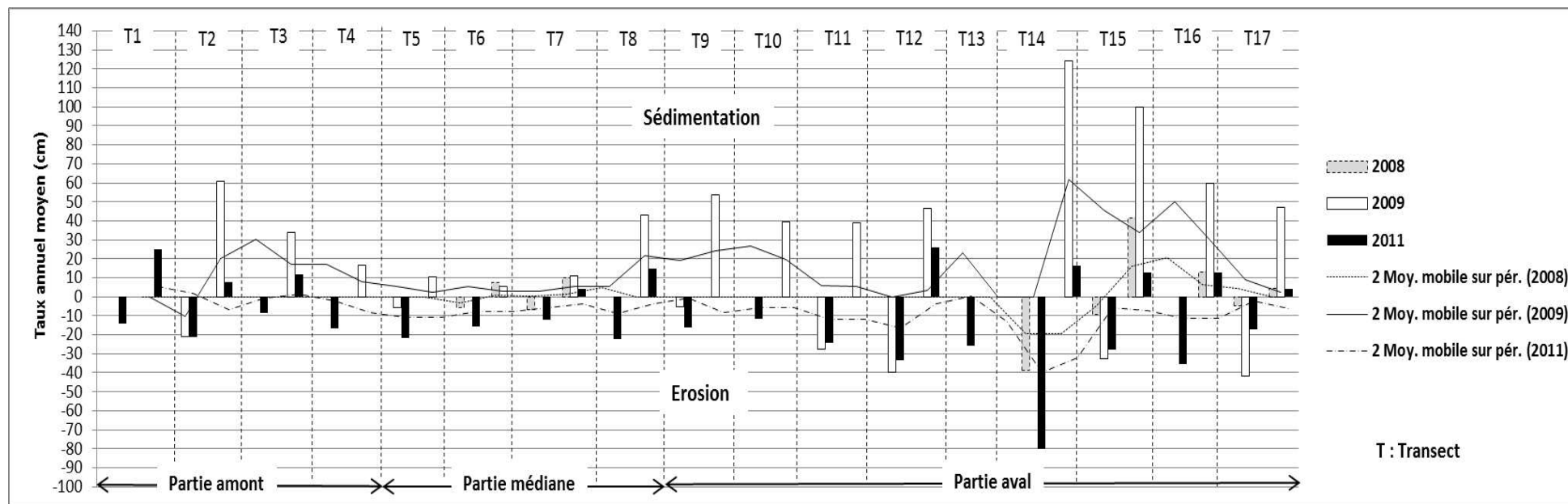


Figure 139. Évolution des taux annuels moyen d'érosion et de sédimentation entre (2008 et 2011)

a.2 Les chenaux secondaires, *calcul du budget sédimentaire et analyse de l'impact des travaux de restauration*

Ce secteur est constitué de 5 bras secondaire : le chenal (A), longeant la rive gauche, ce dernier est en contact avec la Loire au niveau de ces deux extrémités. Les chenaux secondaires (B, C, D et E) sont de taille inférieure au chenal (A), ils représentent des points de connexion de la Loire avec ce chenal (voir page).

La spécificité de cette zone réside en la présence de la chevrette (digue submersible) au niveau de la connexion amont du bras (A), constituant une barrière qui contribue à la réduction du débit au sein du chenal et réduit l'influence du bras principal sur les différentes unités végétalisées (île, îlot et séquence pionnières). L'île de Passy reste, avec le Faubourg de la Charité, l'île la plus ancienne du secteur. Cela témoigne de la relative stabilité des formes insulaires (voir chapitre 4). S'ajoute à cela la présence du pont juste derrière la digue (Pont de Fonte), ces deux aménagements favorisant la sédimentation et l'extension du couvert végétal à l'intérieur de ce bras.

En s'intéresse essentiellement dans ce travail aux secteurs ayant fait l'objet de travaux de restauration (connexions amont et aval).

Evolution topographique des bras secondaires, diagnostique morphosédimentaire des zones concernées par les travaux de restaurations

Le Chenal (A)

La partie amont : La présence de la chevrette au niveau de la connexion amont du bras (A) avec la Loire influence de façon considérablement les vitesses et les directions des courants. Pour des débits inférieurs à 700m^3 , le flux liquide s'introduit dans le bras à travers la brèche. Cette ouverture est orientée de façon parallèle au sens de l'écoulement de la Loire. Cela modifie les modalités de transit des débits solide et liquide : modification de la vitesse et de la direction des courants et création de zones de remous (écoulement perturbé). Les conséquences de ces modifications se font sentir sur la berge située au droit de la brèche où on constate la formation de niche d'érosion. Cette berge joue aussi un rôle de déflecteur de courant en orientant l'essentiel du flux liquide vers le chenal (B). Cela

explique la submersion annuelle de ce chenal et la formation d'atterrissement sableux à l'entrée du chenal (A). Les travaux de restauration réalisés dans ce secteur consistent à une suppression de la végétation au niveau des piles du Pont de Fonte, protection de la berge au droit de la brèche et entretien de la chevrette.

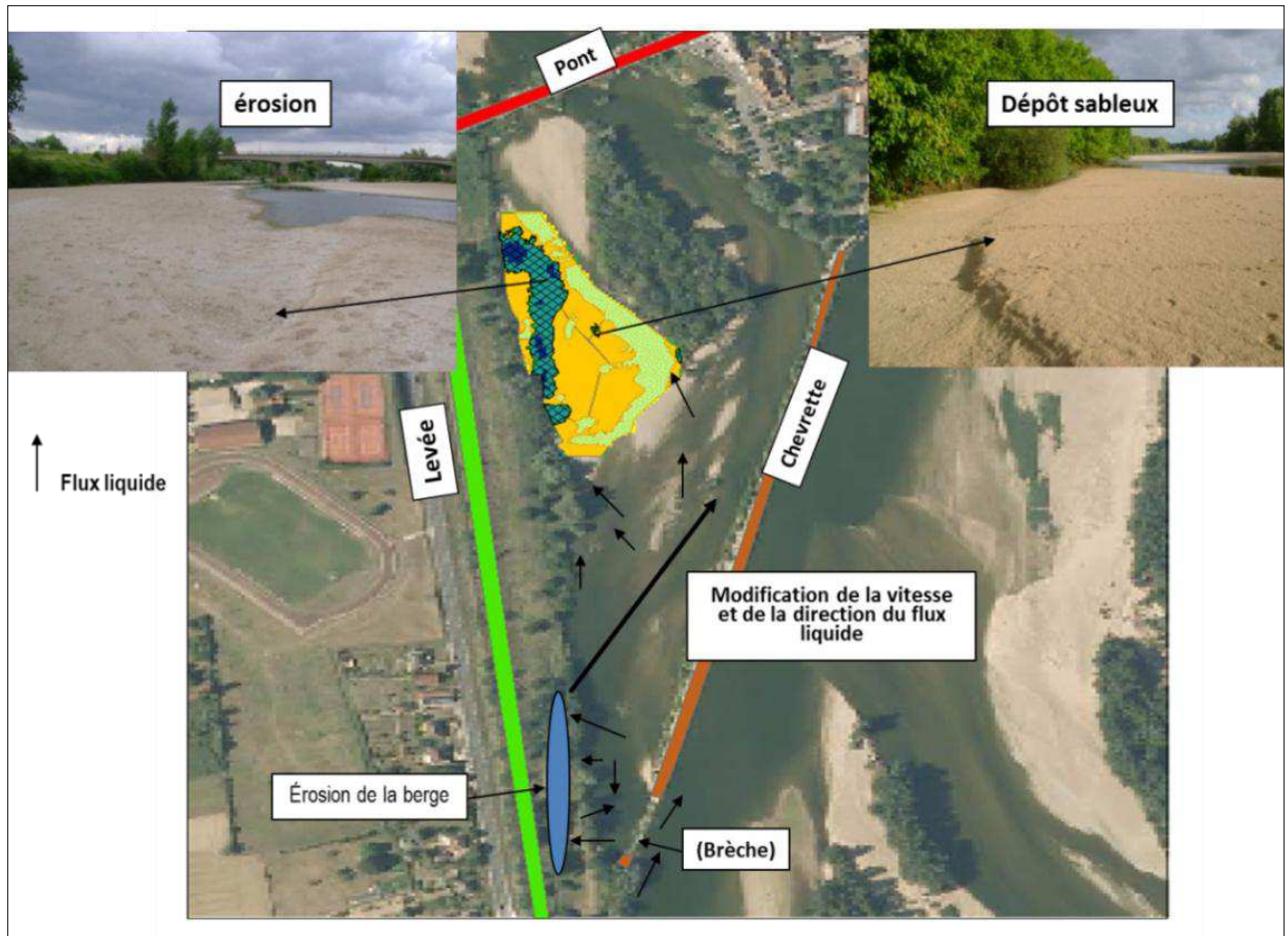


Figure 135. Influence de la chevrette sur la répartition spatiale des flux solide et liquide

L'analyse comparée des Modèle Numérique de Terrain réalisés dans la partie amont du chenal (A) en 2008 et 2009 et 2010 nous a permis d'établir un budget sédimentaire et de déterminer la tendance d'évolution topographique de ce secteur. Les résultats obtenus mettent en évidence un mode de fonctionnement morpho-sédimentaire similaire à celui du chenal principal : une sédimentation en 2009 et un inversement de tendance en 2010 (érosion). Enregistre pour l'année 2008 - 2009 les valeurs suivantes :

- une érosion d'une valeur moyenne de 60 cm sur une superficie de 11496 m², soit 58 % de la surface totale. Le volume moyen de sédiments érodés est de l'ordre de 6897 m³

- une sédimentation d'une valeur moyenne de 1 m sur une superficie de 8324 m², soit 42 % de la surface total. Le volume moyen de sédiments déposés est de l'ordre de 8324 m³. Le budget sédimentaire annuel est d'une valeur moyenne de 1427 m³ en faveur de la sédimentation.

L'année 2009 - 2010 est caractérisée par un déficit sédimentaire. La surface concernée par l'érosion représente 78 %, soit 15459 m². La valeur moyenne d'érosion avoisine 1,1 m. Quant au volume moyen, il est de l'ordre de 17623 m³

Les zones d'accumulation sédimentaire concernent une surface de 4360 m², soit 22 % de la surface totale. L'épaisseur moyenne des dépôts est de l'ordre de 80 cm, soit un volume moyen de 3663 m³

Le budget sédimentaire annuel est d'une valeur moyenne de 13960 m³ en faveur de l'érosion. Cette tendance à l'érosion peut s'expliquer par l'évacuation massive des dépôts sédimentaires accumulés après la crue de novembre 2008. Cependant, ces résultats ne représentent pas la tendance d'évolution de ce secteur à moyen terme. Il s'agit d'une réponse géomorphologique post crue. Nous avons réalisé dans le cadre du Master 1 deux campagnes de mesures topographiques dans ce secteur (2004 – 2005). Ces mesures ont été réalisées dans des conditions hydrologiques similaires à celles de 2010. Les résultats obtenus mettent en évidence une alternance de zone d'érosion et de sédimentation d'une valeur moyenne relativement similaire (entre 45 et 50 cm) et une migration de la ligne du talweg. Les bancs de sables se déplacent sans pour autant disparaître. Cette réorganisation spatiale « permanente » des zones d'érosion et de sédimentation assurée par une submersion fréquente est un facteur limitant le développement de la végétation, c'est pour cette raison que la végétation ne se développe pas dans ce secteur.

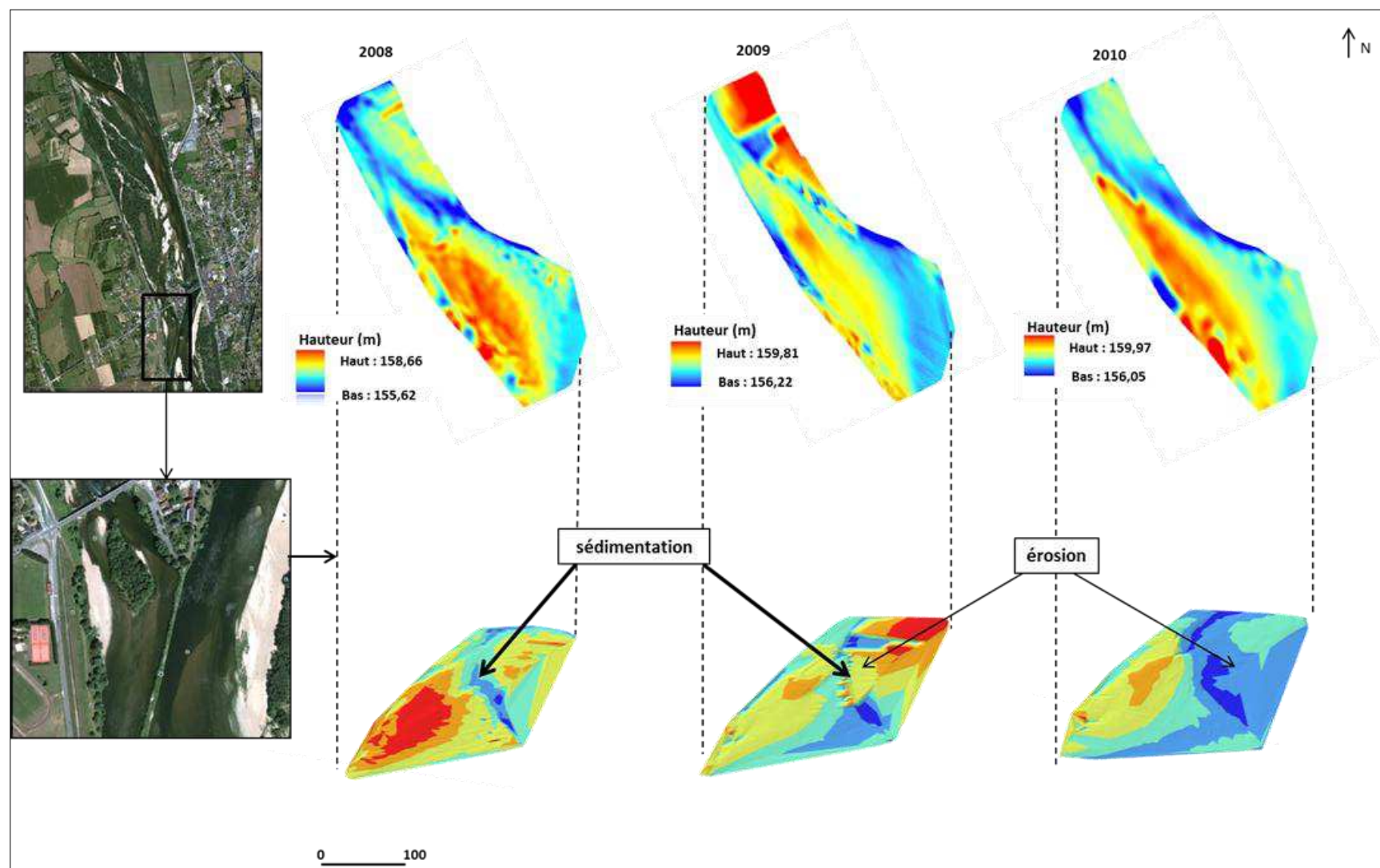


Figure 136. Caractéristiques de l'évolution topographique de la partie amont du chenal (A) entre 2008 et 2010, on constate pour le MNT de 2010, une tendance à revenir à la forme topographique de 2008.

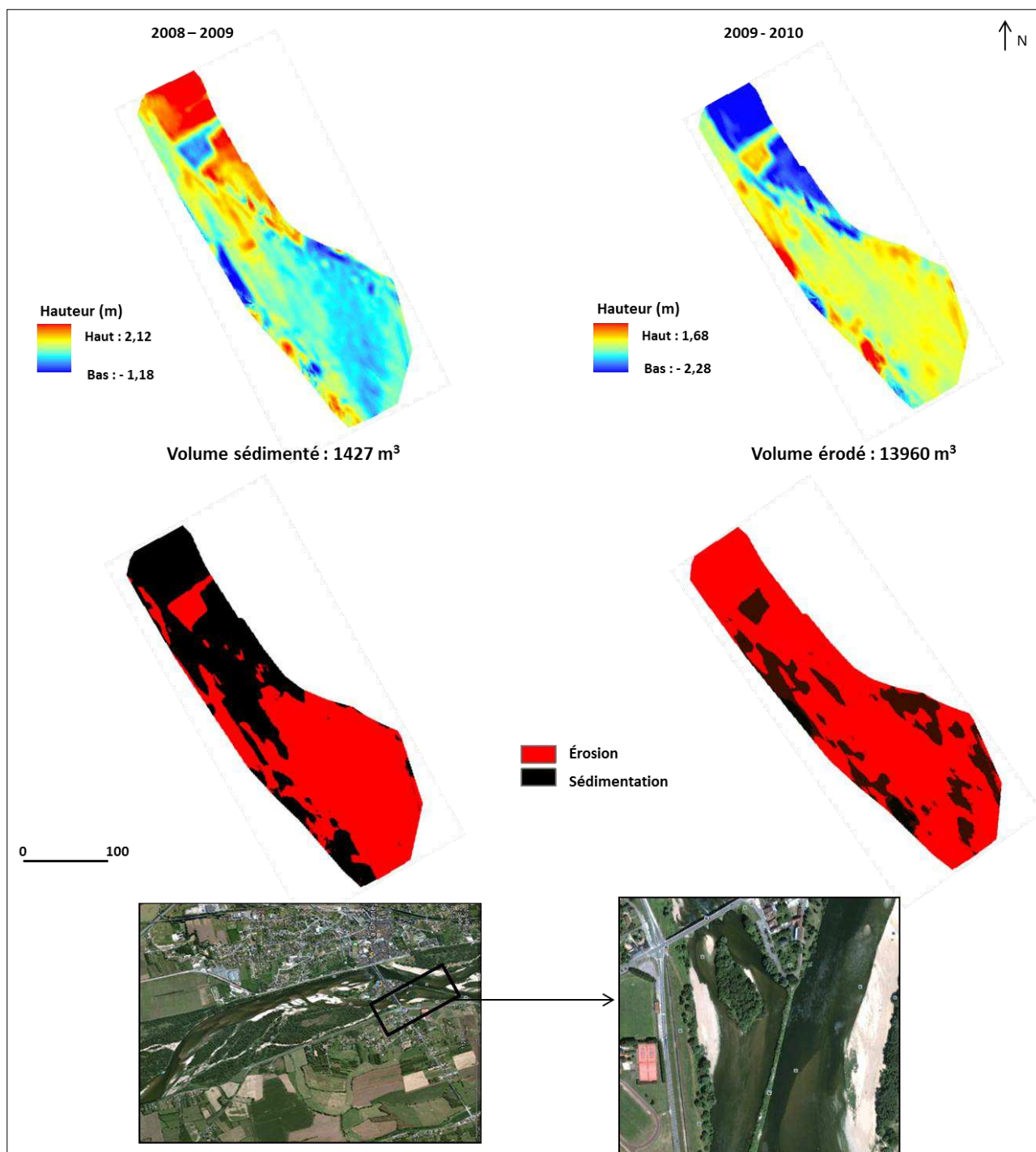


Figure 137. Budget sédimentaire calculé pour les années 2008 – 2009 et 2009 – 2010.

On constate une alternance de phase de sédimentation en 2009 et d'érosion en 2010 (dans la partie amont du bras A).

La partie aval : La connexion aval du bras (A) a fait l'objet de travaux de restauration ayant pour objectif l'élimination des bouchons alluviaux à travers l'augmentation de la capacité de transport solide (augmentation de la pente) et la limitation de l'extension du couvert végétal. L'essentiel de ces travaux a été réalisé en 2005 (élimination de la végétation par scarification). L'analyse comparative des Modèles Numériques de Terrain effectués dans ce secteur en 2008 et 2009 et 2010 met en évidence un mode d'évolution morphosédimentaire différent de celui précédemment décrit dans la connexion amont. On constate une tendance à l'érosion sur toute la période d'étude. Les valeurs les plus importantes ont été relevées en 2009. La crue survenue en novembre 2008 semble avoir favorisé les processus d'érosion dans ce secteur. Cette érosion se poursuit en 2010 avec un rythme moins important.

On enregistre pour l'année 2008 - 2009 les valeurs suivantes :

- une érosion d'une valeur moyenne de 1,4 m sur une superficie de 27063 m², soit 48 % de la surface totale. Le volume moyen de sédiments érodés est de l'ordre de 37617 m³
- une sédimentation d'une valeur moyenne de 1,1 m sur une superficie de 29318 m², soit 52 % de la surface totale. Le volume moyen de sédiments déposés est de l'ordre de 32836 m³

Le budget sédimentaire annuel est d'une valeur moyenne de 4781 m³ en faveur de l'érosion.

L'année 2009 - 2010 est aussi caractérisée par un déficit sédimentaire. La surface concernée par l'érosion représente 54 %, soit 30057 m². La valeur moyenne d'érosion avoisine 1,25 m. Quant au volume moyen des sédiments érodés, il est de l'ordre de 37571 m³

Les zones d'accumulation sédimentaire concernent une surface de 25604 m², soit 46 % de la surface totale. L'épaisseur moyenne des dépôts est de l'ordre de 1,4 m, soit un volume moyen de 35846 m³.

Le budget sédimentaire annuel est d'une valeur moyenne de 1725 m³, en faveur de l'érosion.

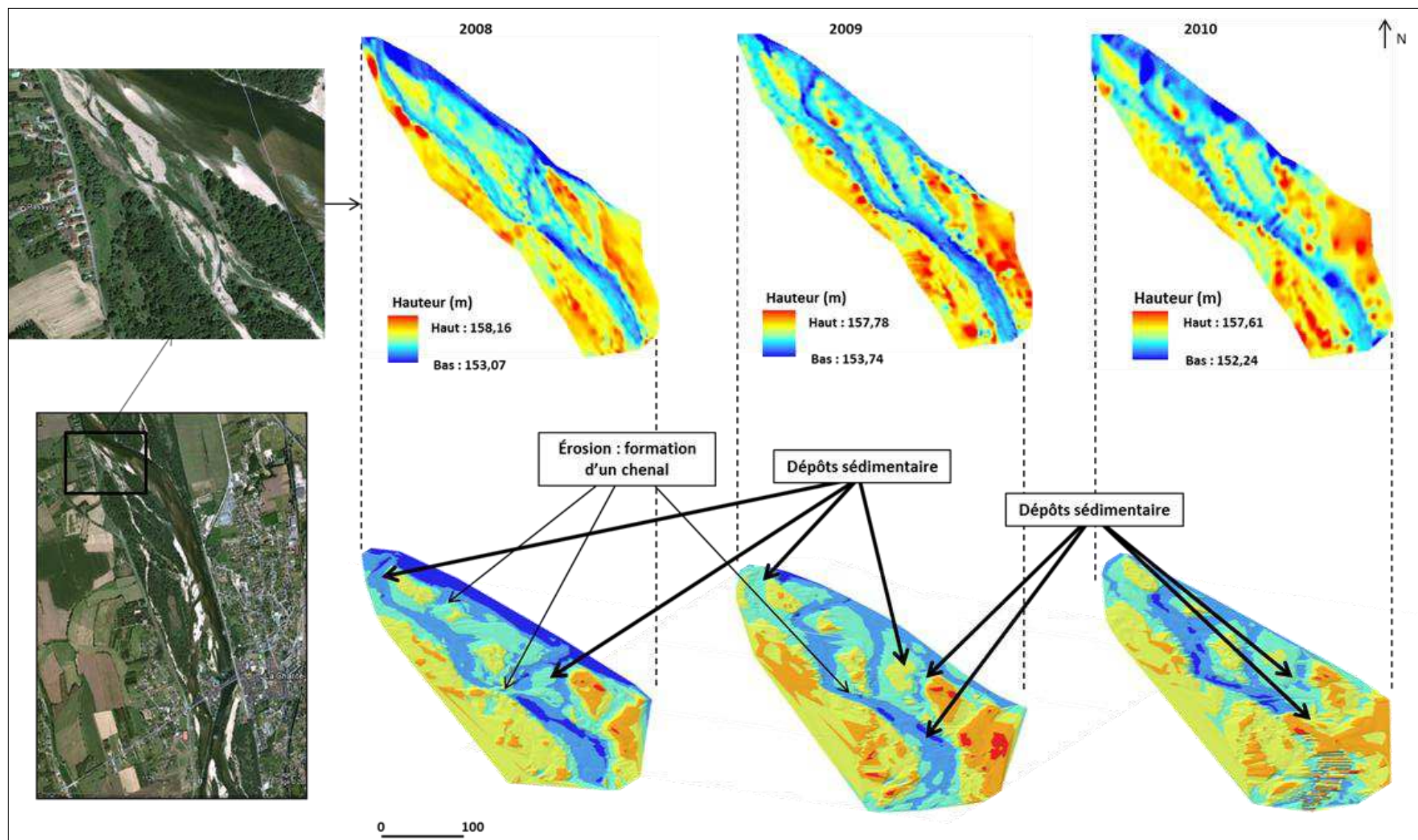


Figure 137. Évolution topographique de la partie aval du chenal (A) entre 2008 et 2010

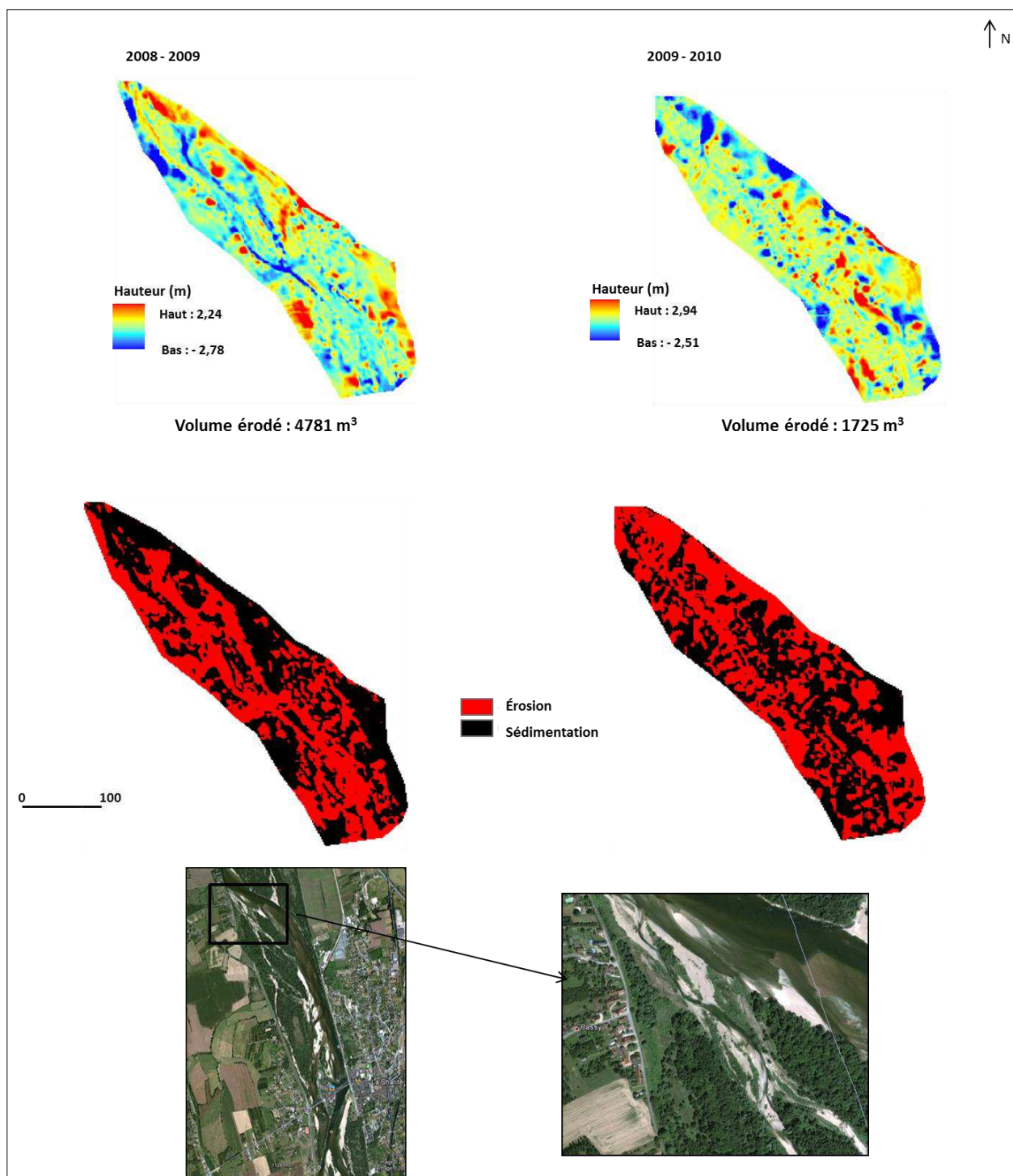


Figure 138. Bilan sédimentaire calculés pour les années 2008 – 2009 et 2009 - 2010,

On constate une tendance permanente à l'érosion (dans la partie aval du bras A).

La charge solide mobilisée est constituée essentiellement de sables fin et grossier. Le départ de ces sédiment laisse apparaître des bancs de galets dans certain endroits. On peut distinguer aussi au niveau de ces zones la formation d'un chenal évoluant vers l'amont.

D'autres indices tels que le déchaussement des racines des végétaux atteste l'effet de l'érosion.



Photo 1. Banc de galet apparu après l'évacuation de banc sable fins



Photo 2. Déchaussement des racines de la végétation

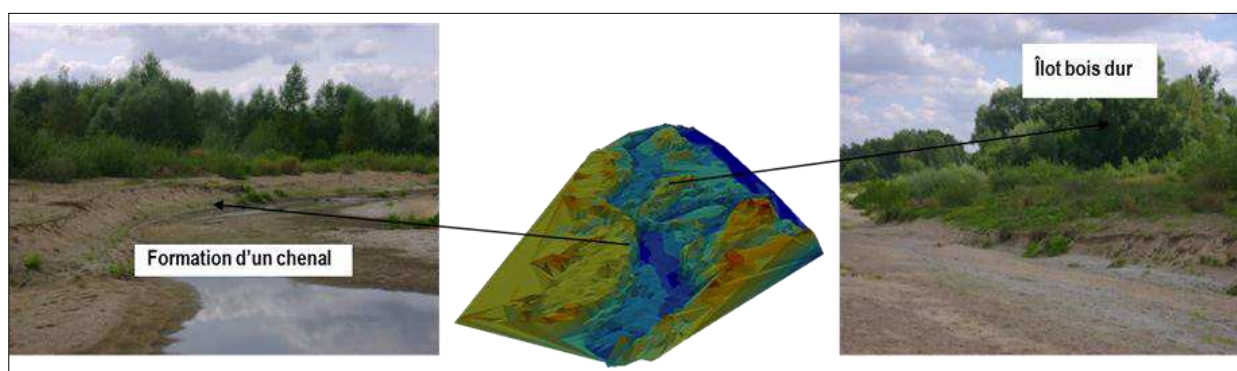


Figure 139. Mise en relation de l'évolution topographique et l'extension spatiale du couvert végétal.

On note la formation d'un chenal au niveau du banc à nu et accumulation sédimentaire dans les zones végétalisées (dans la partie aval du bras A)

Ce secteur nous offre aussi un bel exemple de l'influence des anciens aménagements fluviaux sur l'évolution morphosédimentaire. Il s'agit de vestiges d'une ancienne

pêcherie : des pieux en bois et des blocs semblent renforcer la stabilité d'un banc où enregistre les valeurs topographiques les plus élevées. La progression de l'érosion s'arrête exactement à cet endroit où la végétation se développe à une vitesse considérable. La présence de ces ouvrages ralentit le travail de l'érosion et favorise la formation d'accumulation sédimentaire. La végétation développée dans sur ce banc est d'une hauteur moyenne de 2,5 m (arbre et arbuste). D'après les résultats précédemment présentés (MNT), c'est ce type de végétation qui piège le plus de sédiment. Situé a proximité du franc-bord, ce banc risque à court ou à moyen terme de se rattacher à cette marge latérale du lit.

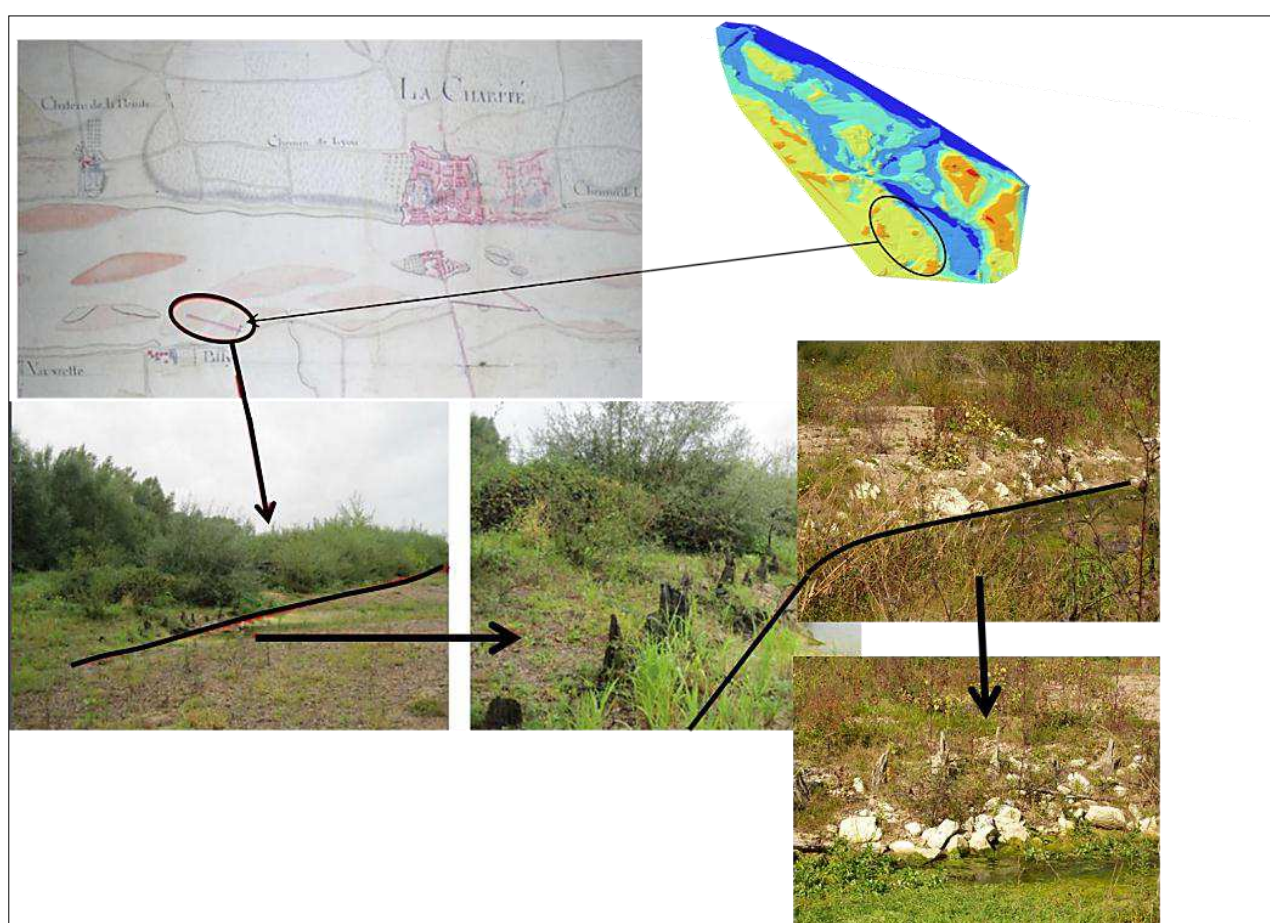


Figure 140. Influence des anciens aménagements fluviaux sur le stock sédimentaire et l'extension du couvert végétal (fixation de sédiments).

L'évolution des pentes relative aux campagnes de mesures 2008 – 2009 et 2009 - 2010 met en évidence une augmentation de la pente (dans les zones d'érosion) de 5 % et de 3 %. Cela correspond à une érosion régressive. Les zones à faibles pentes correspondent aux secteurs de sédimentation qui n'ont pas connu un changement apparent dans les valeurs

de la pente. Le mécanisme de l'érosion régressive est caractérisé par une évolution de l'ablation dans le sens opposé à l'écoulement favorisant l'augmentation de la capacité de transport solide et par conséquent le différentiel de pente.

Les travaux de restauration effectués au sein de cette zone avaient pour objectif de favoriser l'érosion régressive afin d'évacuer les bouchons alluviaux formés à la sortie du bras (A). Les résultats obtenus attestent l'efficacité de ces interventions et montre aussi le rôle des paramètres physiques (pente, profile en long) dans l'évolution morphodynamique des hydrosystèmes fluviaux. L'évolution du couvert végétal est un autre paramètre à prendre en compte. Les fréquence des intervention doit s'adapter au mode dévolution spatial de la végétation.

L'évolution du couvert végétal (connexion aval bras A, application de la méthode : MNT-du ballon captive)

Le couvert végétal constitue un élément de contrôle de l'évolution morphodynamique au sein des cours d'eau. De nombreuses techniques de génie végétale ont montré leurs efficacité contre la menace d'érosion des berges. Le couvert végétal joue aussi un rôle important lors des crue (frein pour les écoulements). Dans d'autre cas, cette même végétation peu avoir des effets indésirables tel la fixation des bouchons alluviaux (banc de sables) entravant le passage des eaux et favorisant la fermeture du paysage fluviaux à travers la réduction de la section mouillée..

Le secteur d'étude (la connexion aval du bras (A) est partiellement occupé par une végétation pionnière constituée essentiellement de saulaies et peupleraies. La moyenne d'âge de ces végétaux varie entre 3 et 4 ans (étant donné que la dernière opération de dévégétalisation à eu lieux en 2005 et 2006). Quant à leur hauteur moyenne, elle est d'environ 2,5 m. L'analyse de la carte de l'évolution spatiale du couvert végétale réalisée entre 2008 et 2009, à partir des images à haute résolution spatiale (ballon captif), et d'une enquête sur le terrain, met en évidence les résultats suivants :

une extension de la végétation sur une surface de 1331 m² au sein des zone de sédimentation (bancs formés sur les marges d'île et franc-bord)

une disparition de la végétation sur une surface de 1150 m² au sein des zones affectées par érosions (au niveau du chenal formé en 2009) (voir figure 4)

En 2010, le couvert végétal s'est étendu sur une surface supplémentaire de 971 m². Quant à la surface concernée par la disparition de la végétation, elle avoisine les 441 m². On constate d'après ces résultats une réduction considérable de la surface affectée par l'érosion de la végétation en 2010. Il serait donc nécessaire d'effectuer des opérations de dévégétalisation afin de limiter l'extension spatiale du couvert végétal.

Les zones de développement de la végétation concernent les bancs formés sur les marges des îles et franc-bord. Ces secteurs sont presque à la même hauteur que les îles. Ils représentent de ce fait des lieux favorables au développement de la végétation. L'écart topographique entre ces bancs et la ligne de talweg est de 1,8 m. L'érosion du couvert végétal concerne les marges latérales de ces bancs en raison du travail de l'érosion régressive. Cela atteste l'efficacité de ce type d'érosion susceptible de déstabiliser des bancs végétalisés. **Ce constat met aussi en évidence l'influence de la végétation sur la hauteur et la superficie des zones de sédimentation.** Autrement dit, la végétation piège les sédiments sur un périmètre plus grand que celui qu'elle occupe (ralentissement des écoulements), ce qui explique l'étendue des superficies des zones de sédimentation.

Le croisement des résultats de la modélisation topographique (MNT) avec ceux de l'évolution du couvert végétal nous a permis d'identifier le type de végétation qui piège plus de sédiments (une valeur annuelle moyenne de 40 à 50 cm). Il s'agit essentiellement de saule et peuplier de hauteur moyenne d'avaisant les 2 m. Ces informations peuvent servir d'éléments d'orientation des actions de restauration et d'entretien dans ce secteur.

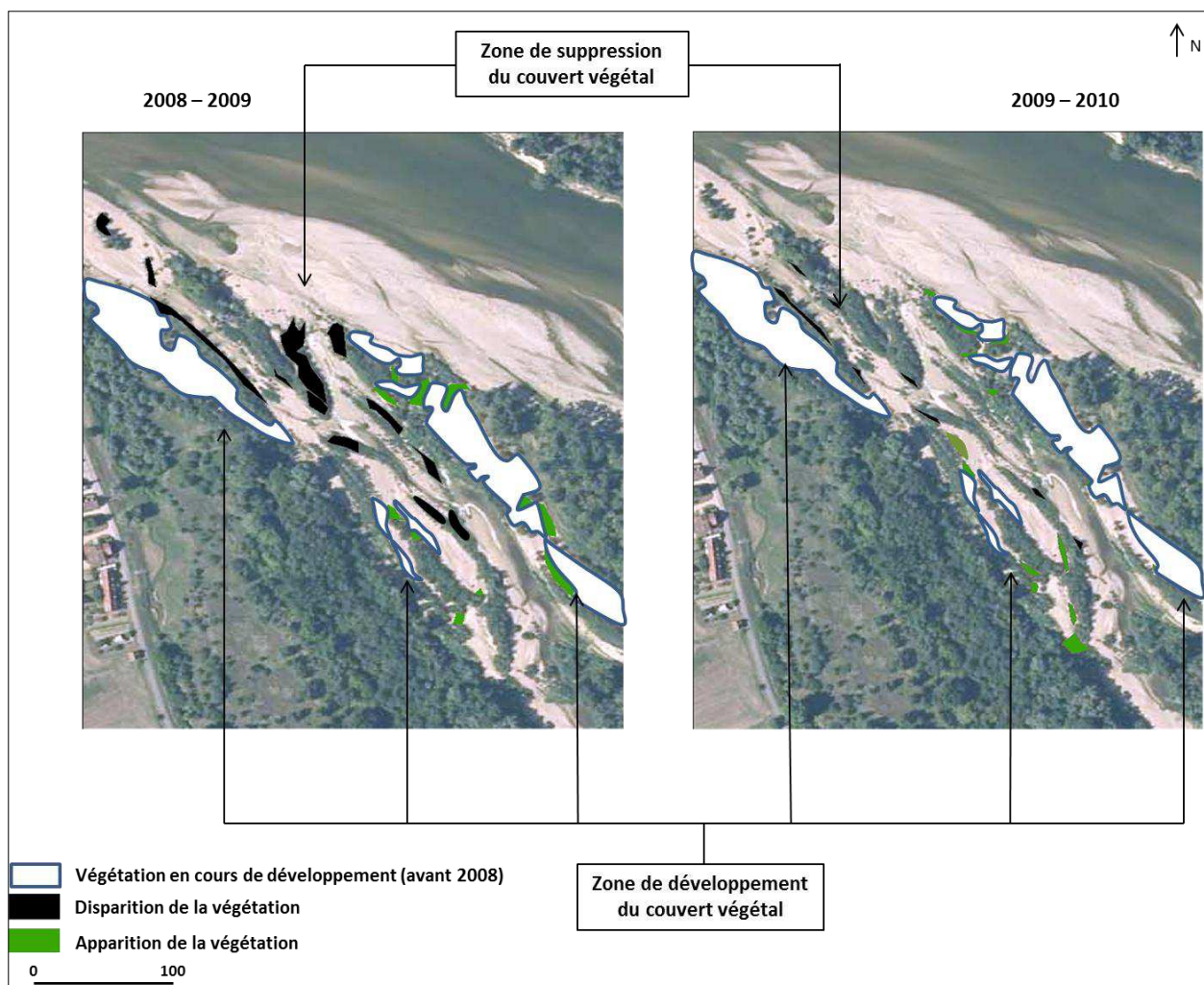


Figure 141. Évolution spatiale du couvert végétal entre 2008 et 2010.

Les zones de disparition du couvert végétal correspondent au secteur d'érosion et les secteurs de sédimentation sont occupés par une végétation d'une hauteur moyenne de 2 m.

Le chenal (B) : ce bras s'est formé après 1969, ça formation correspond à la période de développement de la brèche dans la chevrette (voir chapitre 4, figure 7). Aujourd'hui, ce chenal est en eau toute l'année. Les travaux de restauration effectués dans ce secteur consistaient à la suppression de la végétation au niveau des piles du pont de Fonte à fin de faciliter le transit des flux liquide et solide. L'analyse des profils transversaux réalisés au sein de ce chenal entre 2008 – 2011 révèle un mode d'évolution topographique similaire à celui du chenal principal : un réhaussement du placher alluvial en 2009 et une reprise de l'érosion engendrant un abaissement du fond du chenal en 2011. Les valeurs relevées sont comme suit :

Profil 1 (2008 – 2011) : un réhaussement d'une valeur moyenne de 34 cm sur tout le profil en 2009 et un abaissement d'une valeur moyenne de 33 cm relevé en 2011, soit un rythme annuel de 16,6 cm. cet abaissement concerne toute la section transversal. La valeur de la ligne du talweg enregistrée pour l'année 2011 est inférieure à celle de 2008. on note une incision de 15 cm

Profil 2 (2008 – 2009) : un réhaussement d'une valeur moyenne de 37 cm sur toute la section transversal.

Profil 3 (2008 – 2009) : un réhaussement d'une valeur moyenne de 61 cm sur la majeure partie du profil (25 m) et une formation d'une zone d'érosion sur environ 2 m. la valeur moyenne de cette incision est de l'ordre de 11 cm.

Profil 3 (2008 – 2009 - 2011) : un réhaussement du fond du chenal constaté sur pratiquement toute la section transversal, la valeur moyenne relevé est de l'ordre de 44 cm. L'incision reprend le dessus en 2011 sur tout le profil. La valeur moyenne d'abaissement est de l'ordre de 52 cm, soit un rythme annuel de 26 cm. Comparer à l'année 2008, la valeur du talweg à baissée de 28 cm

L'impact morphogène de la crue de novembre 2008 s'est fait sentir sur l'évolution topographique de ce chenal. Les apports sédimentaire ont excédés la capacité de transport. Cela à engendré un réhaussement du fond du chenal. Cette tendance à l'exhaussement s'est inversée en 2011 avec un abaissement qui atteint des valeurs inférieures à ceux relevés en 2008. La tendance à l'incision semble être le trait caractéristique de l'évolution verticale du fond du chenal en dehors de la période de crue.

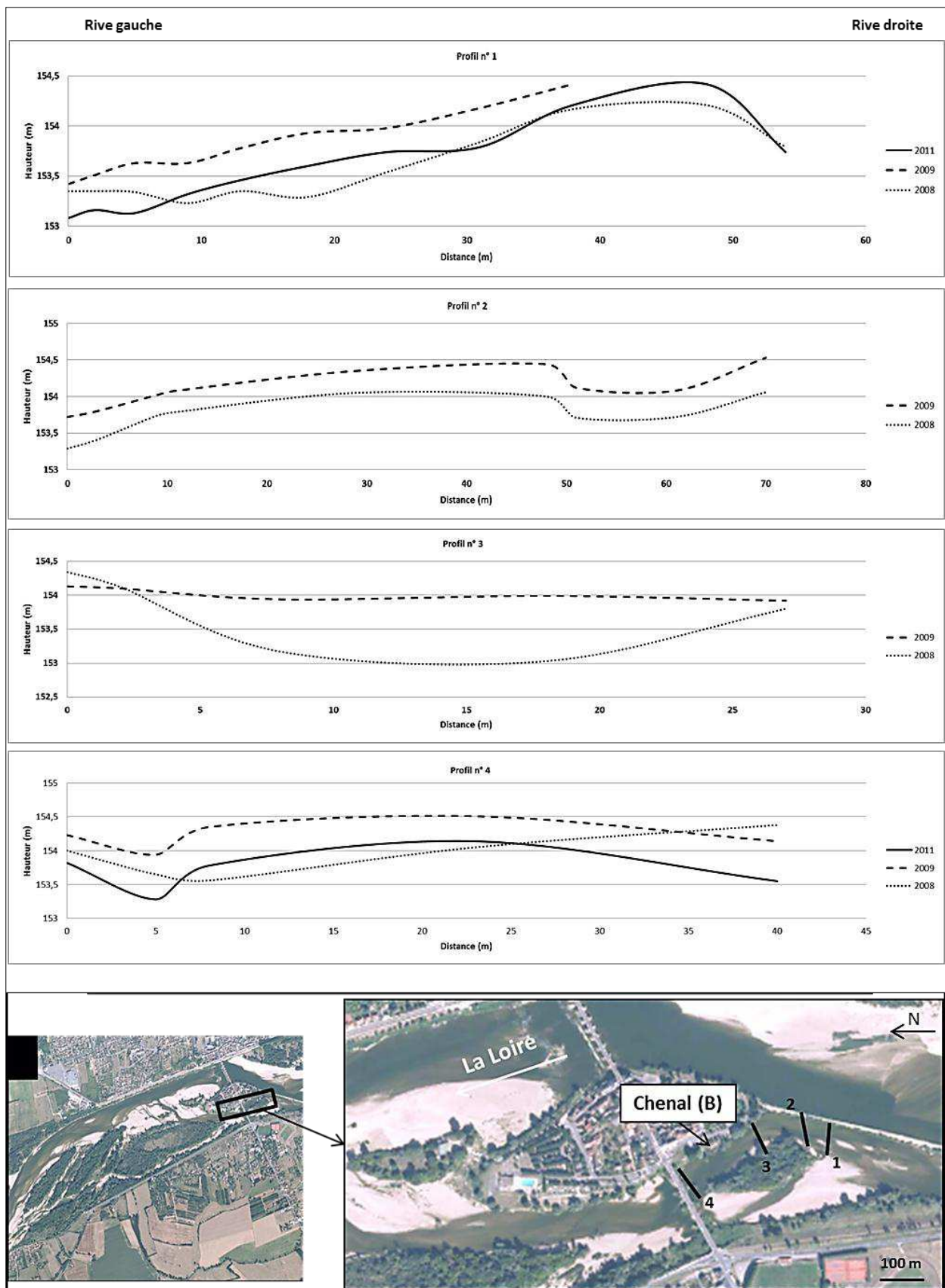


Figure 142. Évolution topographique du chenal (B) entre 2008 et 2011, un impact morphogène de la crue 2008 en faveur de la sédimentation.

Les chenaux (C) et (D) n'ont pas fait l'objet de mesures topographiques en raison de la difficulté d'accès. La densité de la végétation rend impossible la réalisation de mesures topographiques (coupure de signal radio du DGPS)

Le chenal (E) : ce bras a fait l'objet de travaux de dévégétalisation afin d'assurer une connexion supplémentaire de la Loire avec le chenal (A), cette connexion se fait à partir d'un débit avoisinant 400 m^3 . L'augmentation de la compétence de ce bras favorise l'évacuation des bouchons alluviaux et accroît la capacité de transport de la charge solide au niveau de la connexion aval du chenal (A).

Les travaux de restauration du bras ont eu lieu en 2010. Cette opération a consisté en une suppression de la végétation au niveau des bouchons alluviaux formés dans le chenal. Nous avons réalisé, à la demande de la DREAL Centre, des mesures topographiques avant et après les travaux (2010 – 2011). Cela afin d'évaluer la réponse géomorphologique de ce chenal suite à ces interventions. Les résultats obtenus mettent en évidence un abaissement du niveau topographique sur la majeure partie du bras. Cela traduit une augmentation de la capacité de transport du chenal suite à la suppression de la végétation susceptible de ralentir la vitesse d'écoulement et de piéger les sédiments.

On relève dans **la partie amont** du bras, sur les profils 1 et 2 une incision sur toute la section transversale. La valeur moyenne de cet abaissement est respectivement 22 cm et 21 cm. L'évolution topographique du profil 3 se caractérise par un abaissement d'une valeur moyenne de 14 cm, sur une grande partie du profil. Quant à l'épaisseur moyenne des dépôts elle est de l'ordre de 4,5 cm. On constate sur le profil 4 un réhaussement sur une grande partie de la section mesurée, l'épaisseur moyenne des dépôts sédimentaires est de l'ordre de 7 cm. Le secteur d'incision se situe en rive droite, on enregistre un abaissement de 23 cm

Dans **la partie médiane**, l'évolution topographique des profils 5 et 6 est en faveur de l'érosion, les valeurs moyennes relevées sont respectivement 26 cm et 22 cm. Une accumulation sédimentaire d'une valeur moyenne de 22 cm s'est formée en rive gauche sur le profil 5. L'évolution des profils 7 et 8 est marquée par une tendance à la sédimentation, la valeur moyenne relevée pour les deux profils est de l'ordre de 19 cm (voir figure 10).

L'analyse comparative des profils de **la partie aval** se caractérise par une alternance de zones affectées l'érosion et de sédimentation avec des valeurs moyenne relativement faible. On enregistre pour le profil n°9 un abaissement moyen d'une valeur de 13 cm. L'évolution topographique du profil n° 10 se caractérise par : un réhaussement d'une valeur moyenne l'ordre de 11 cm sur une grande partie du transect et un abaissement d'une valeur moyenne de 9,5 cm en rive droite (sur 2 m). l'évolution verticale des profils 11 et 12 est marqué par une alternance de zone d'érosion et de sédimentation avec des valeurs moyenne relativement faible, soit une valeurs moyenne avoisinant les 10 cm pour les zones affectées par l'érosion et 6 cm pour les secteur de sédimentation. (voir figure 12). Dans l'ensemble, l'évolution verticale du chenal (B) se caractérise par un gradient décroissant « amont-aval » des valeurs moyenne d'érosion. Cela traduit une diminution de la compétence du chenal au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'aval. Cependant la suppression de certains bourrelets au niveau de la partie médiane du chenal favorise l'établissement d'un différentiel de pente susceptible d'acroître la capacité de transport de la charge solide. Les valeurs moyennes d'érosion enregistré sont dans la majorité des cas supérieur à ceux de la sédimentation. La tendance de l'évolution topographique du chenal est en faveur de l'érosion.

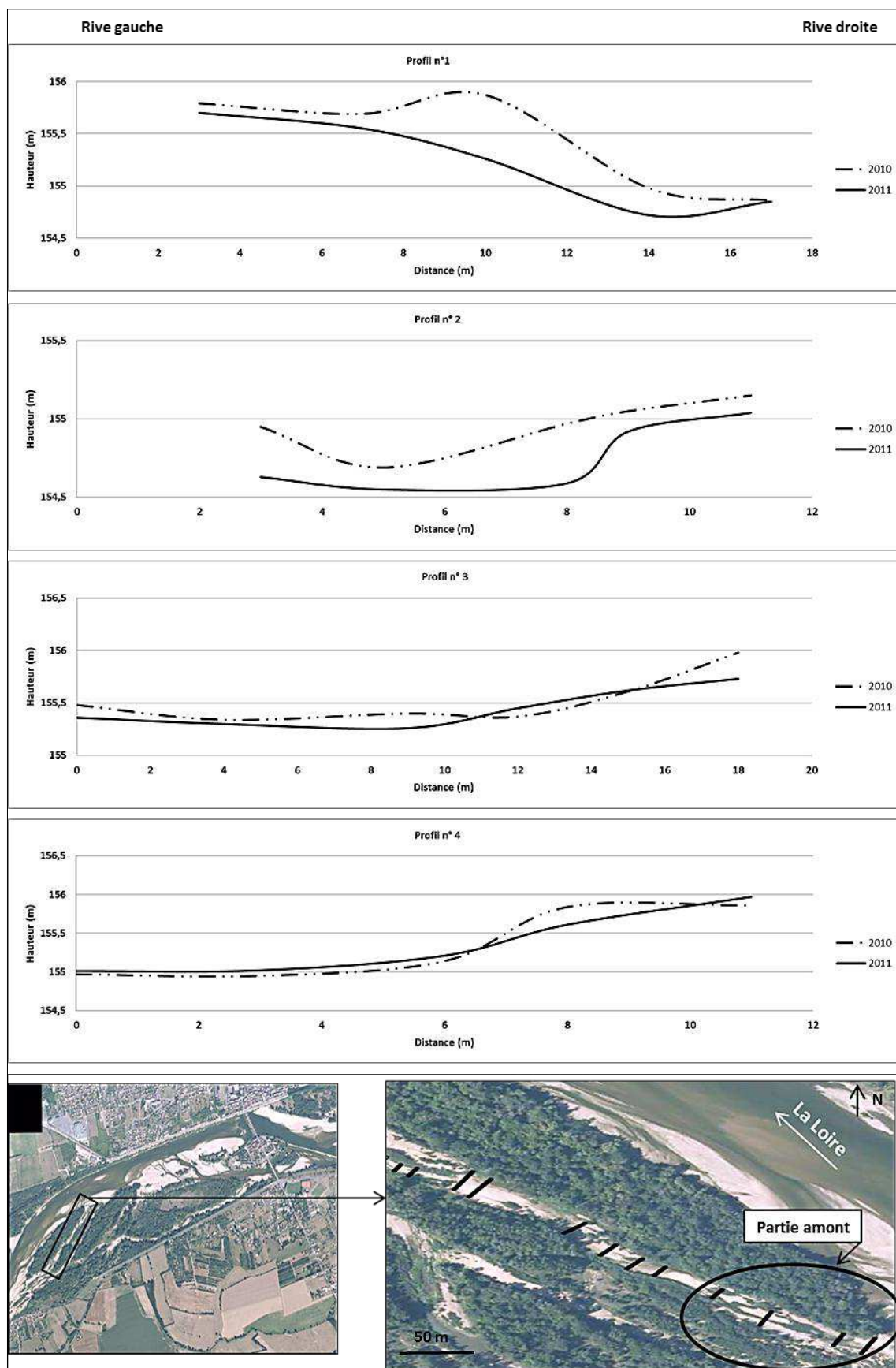


Figure 143. Évolution topographique des profils transversaux entre 2010 et 2011 (partie amont, chenal E).

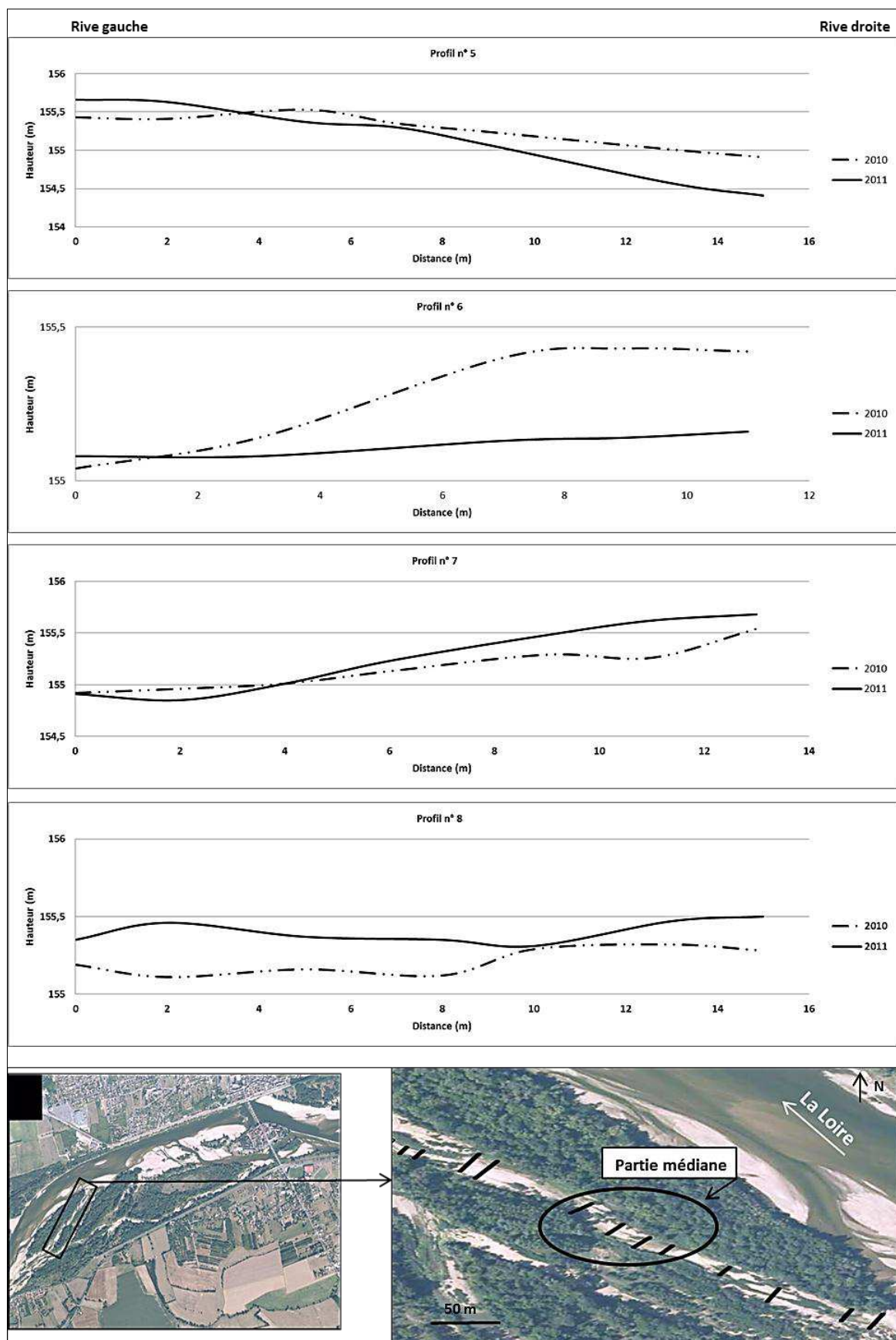


Figure 144. Évolution topographique des profils transversaux entre 2010 et 2011 (partie médiane, chenal E).

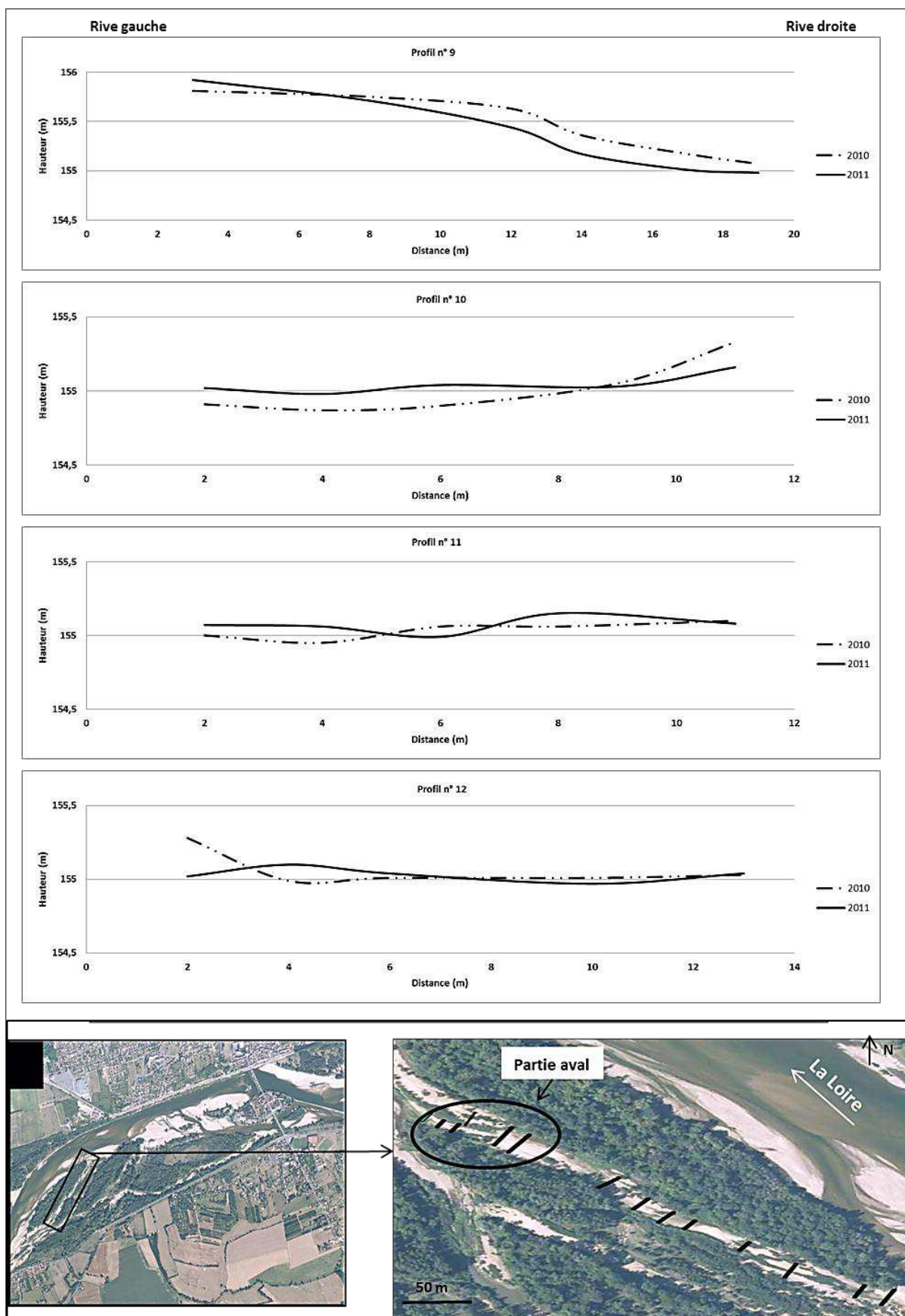


Figure 145. Évolution topographique des profils transversaux entre 2010 et 2011 (partie aval, chenal E).

Les résultats de la présente analyse montrent que le site de la Charité évolue sous une pression anthropique et mettent en évidence l'impact morphogène des événements hydrologiques. Les paramètres de réajustement du chenal s'adaptent aux fluctuations des débits solides et liquides. Ces derniers sont modifiés par les différents aménagements dont certains n'ont plus de fonction aujourd'hui (chevrette). La rupture de la continuité sédimentaire s'accompagne de phénomènes d'érosion et de dépôt modifiant ainsi le profil en long. Dans le cas de ce site d'étude, on remarque que les processus d'ajustement du lit n'évoluent plus dans des conditions naturelles : *respiration à court terme du cours d'eau répondant aux fluctuations des débits solides et la capacité de transport (phénomène réversible)*. On est plutôt dans une tendance à long terme où le profil en long s'adapte aux variations d'écoulement et de transport. On se demande si on n'a pas dépassé le seuil d'irréversibilité ?

Les interventions de restauration réalisées au niveau de la connexion aval du bras secondaire ont favorisé le transfert de sédiments vers la Loire. L'efficacité de ces travaux est due au travail de l'érosion régressive. On constate par ailleurs que le développement (rapide) de la végétation (saules et peuplier) favorise la fixation des dépôts alluviaux et accroît leur résistance à l'érosion. **La fréquence des interventions de dévégétalisation devrait donc s'adapter au rythme d'évolution du couvert végétal.** Dans le cas présent une fréquence de 2 ans serait suffisante pour réduire l'influence de la végétation.

Au niveau de la connexion amont du bras secondaire, la compétence de l'écoulement peut être augmentée en abaissant le seuil de connexion, c'est à dire abaissement d'une partie de la Chevrette. Car cet ouvrage influence la vitesse et la direction de l'écoulement et favorise la formation d'atterrissement au niveau du chenal A (voir figure 42).

La réactivation des chenaux secondaires peut jouer un rôle important dans l'abaissement de la ligne d'eau en cas de crue. L'ouverture des bras secondaires est aussi un moyen efficace pour lutter contre la fusion des îles qui est un phénomène répandu en Loire moyenne (Grivel, 2008). Il est donc recommandé de maintenir le fonctionnement de ces annexes d'écoulement. Par contre leur rôle dans la réduction de l'incision du chenal principal reste à prouver. La charge solide à injecter dans la Loire devrait être au-dessus de

sa capacité de transport, c'est à dire une classe granulométrique supérieure ou égale à celle du fond du lit. Cette dernière ne se trouve pas pour l'instant dans la charge solide susceptible de transiter du chenal secondaire vers la Loire. **Les travaux de restauration sont nécessaires pour maintenir les bras secondaires actifs mais pas suffisants (en vue des conditions hydrologiques actuelles) pour pallier l'incision du plancher alluvial.**

b. Site atelier de Guilly

b.1 Analyse topographique et calcul de budget sédimentaire

Des seuils artificiels et des îles qui influencent en permanence la morphodynamique fluviale

On distingue d'après les résultats de la modélisation topographique du site atelier de Guilly une anomalie dans la répartition spatiale du stock sédimentaire au sein du lit mineur. Cette discontinuité sédimentaire (longitudinale) met en évidence deux zones bien distinctes :

- un secteur de sédimentation concernant la moitié amont du site (la première boucle) ;
- un secteur d'érosion ou de transfert de la charge solide couvrant l'étendue spatiale de la moitié aval du site d'étude (la seconde boucle).

Ce déséquilibre sédimentaire peut être lié à la présence de nombreux seuil rocheux au niveau de la première boucle et aussi à la forme sinueuse du lit (berge convexe). On retrouve des seuils durs ; à l'entrée du site au niveau de la connexion de la Loire avec le bras secondaires dit « bras des Mais », le long de la rive gauche au niveau du quai à Bouteille et au niveau de l'île située au droit du port de Saint Benoit. La vitesse et l'orientation du flux liquide sont modifiées par ces anciens ouvrages fluviaux. Il en résulte une répartition particulière des seuils et des mouilles dans le lit mineur. On retrouve certaines mouilles près des berges convexes et des accumulations sédimentaires au niveau des berges concaves. Les mouilles les plus importantes se trouvent au niveau des extrémités amont et aval du site. Le différentiel topographique entre les point les plus profond dans ces deux mouilles est d'environ 1 m. cela signifie que le rythme d'érosion dans la mouille situé dans la partie aval est plus important. On retrouve ces deux mouilles dans la carte réalisée par **Y. Babonaux** en 1970 (voir figure 15). La réduction de la mobilité

latérale du lit mineur à travers l'édification des digues favorise la pérennité de ces mouilles et par conséquent l'érosion de la berge. De ce fait, ces zones profondes représentent une menace pour la stabilité des levées (formation de renard).

La seconde particularité du site est la présence d'îles au milieu du chenal. Cela représente un autre indice attestant le déséquilibre morphosédimentaire au sein du lit mineur. Théoriquement, dans un cours d'eau à tracé sinueux, la charge sédimentaire se dépose au niveau des berges concaves. La ligne de talweg passe d'une berge concave à une autre à travers le centre du chenal. Ceci est loin d'être le cas du site d'étude. On remarque par ailleurs que ces formes insulaires se trouvent souvent à l'aval de seuils rocheux susceptibles de renforcer leur stabilité. La fixation des atterrissements et des mouilles à travers les seuils rocheux, levées et îles peut avoir un impact non négligeable sur l'évolution du profil en long et des profils en travers au sein du lit mineur.

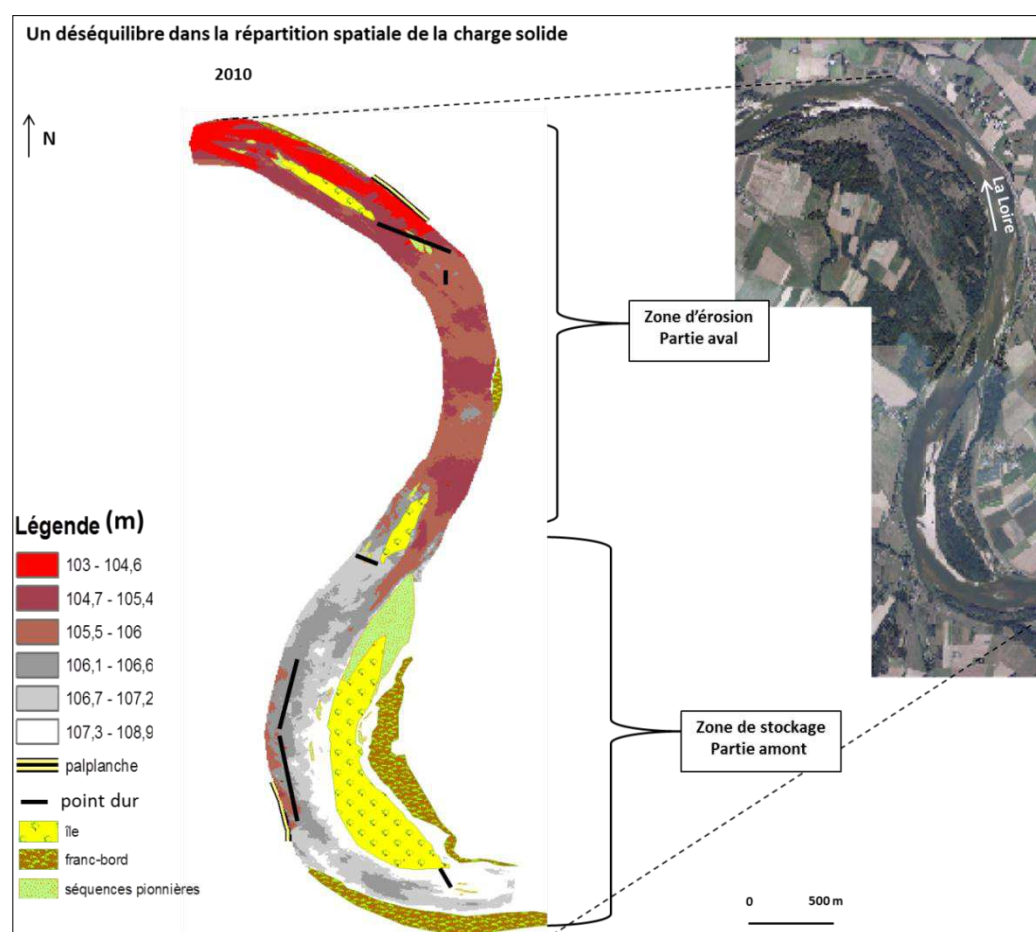


Figure 146. Identification des secteurs de sédimentation et d'érosion et mise en relation avec la répartition spatiale des seuils rocheux et des îles.

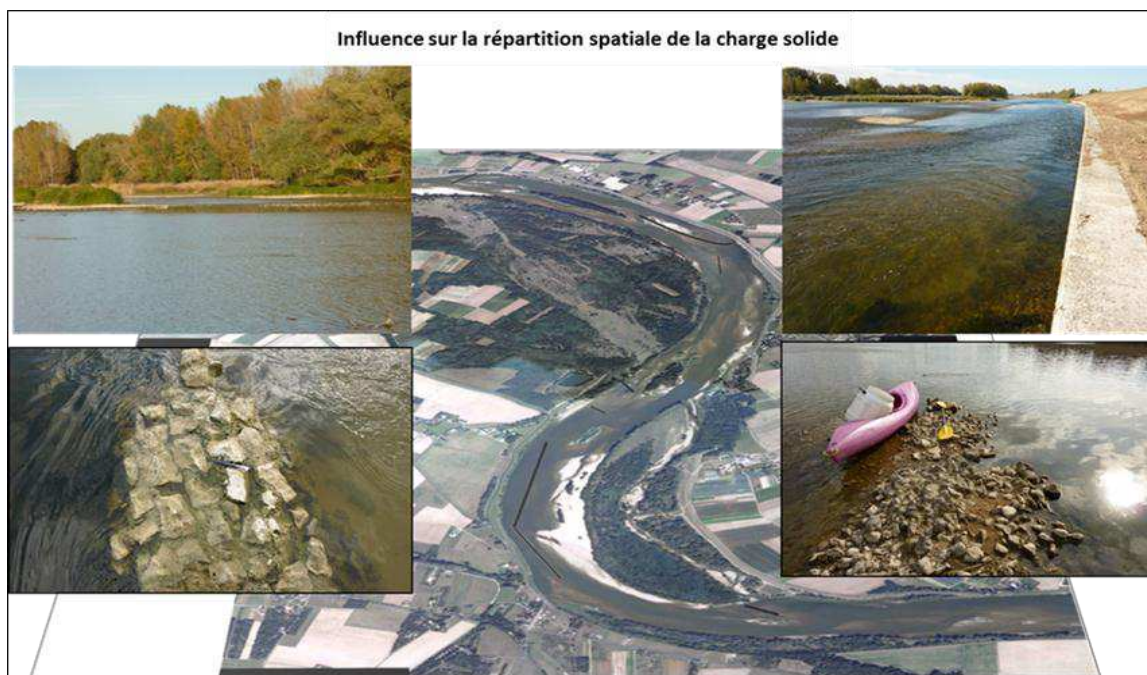


Figure 147. Une omniprésence de seuils rocheux susceptible de modifier la dynamique morphosédimentaire

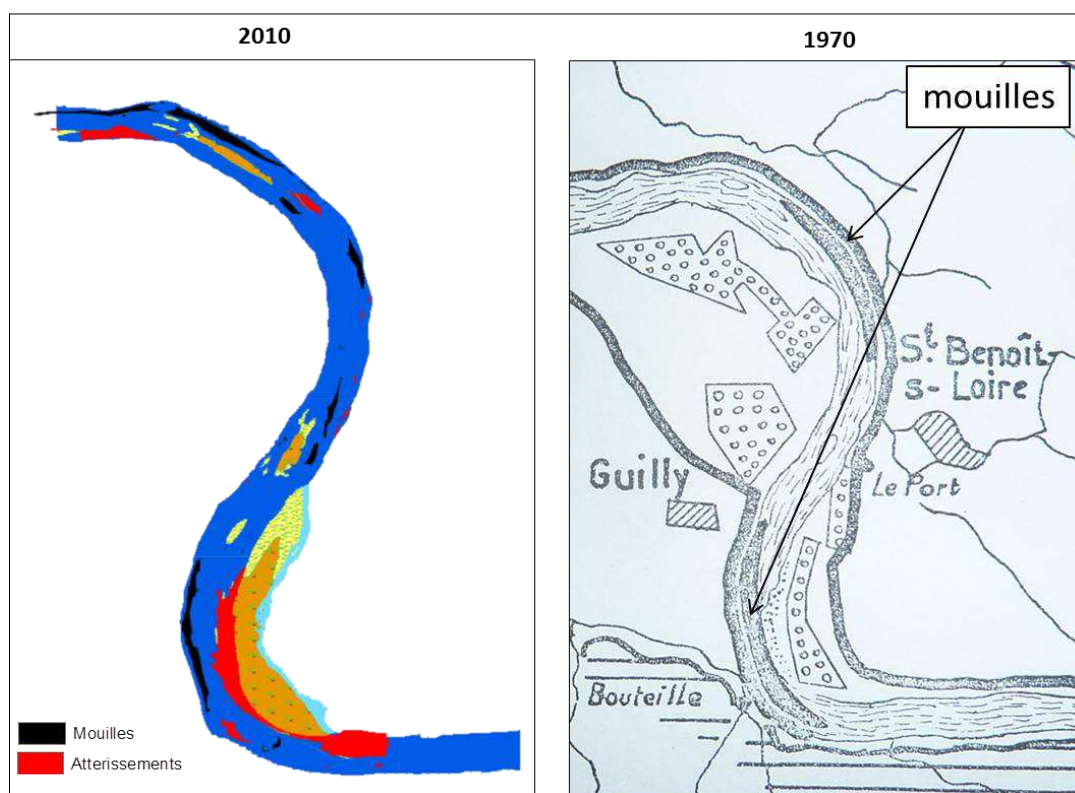


Figure 148. Localisation des mouilles dans le site atelier de Guilly en 1970 (Y. Babonaux) et en 2010.

Les mouilles le plus importantes se situent toujours au même endroit (au niveau des berges concaves amont et aval), l'érosion est active dans ces zones profondes et peut avoir des effets néfastes sur la stabilité des levées.

En fonction de cette répartition spatiale du stock sédimentaire, nous avons défini trois secteurs pour faire l'objet d'une analyse fine : en amont du site d'étude, dans la partie médiane au niveau de la zone de transition entre les deux boucle et dans la partie aval du site.

L'analyse de l'évolution topographique réalisée au moyen de comparaison de MNT fait ressortir deux types de tendances (qui semblent être des tendances continues) : une tendance à la sédimentation au niveau de la partie amont et une tendance à l'érosion dans la partie médiane et la partie aval. Les apports sédimentaires se déposent essentiellement au niveau de la première boucle.

On remarque aussi que la crue survenue en novembre 2008 n'a pas inversé ces tendances d'évolutions morphosédimentaires comme s'est le cas dans le site de la Charité-sur-Loire, où nous avons constaté un rehaussement du plancher alluvial en 2009. A Guilly la crue a plutôt renforcé la tendance de sédimentation dans la première boucle et accentué l'érosion dans la seconde boucle.

Calcul du Budget sédimentaire (2008 à 2010)

Les résultats de la comparaison des Modèle Numérique de Terrain réalisés en 2008, 2009 et 2010 nous ont permis d'effectuer une cartographie précise des zones de sédimentation et d'érosion et de bien saisir la dynamique morphosédimentaire du plancher alluvial.

- **La partie amont** : le budget sédimentaire calculé pour l'année 2008 -2009 est en faveur de la sédimentation. Le volume moyen de sédimentation est de 69100 m³. Cette charge solide s'est répartie sur l'ensemble de ce secteur à l'exception de la mouille situé au niveau de la rive droite à Bouteille (entre la levée et un seuil rocheux). Enregistre dans cette zone une érosion moyenne de 7 cm. En 2010 la tendance de l'évolution topographique reste toujours en faveur de la sédimentation avec des valeurs moins importantes que ceux de l'année 2009 (en raison des apports massifs de la crue). Le volume moyen enregistré pour l'année 2009 – 2010 est de l'ordre de 35827 m³, soit environ la moitié du stock sédimentaire accumulé dans ce secteur en 2009. Le plancher alluvial tend à revenir à la

forme qu'il avait en 2008, ce qui laisse penser à l'existence de zones préférentielles de dépôts et d'érosion en dehors des périodes de crue.

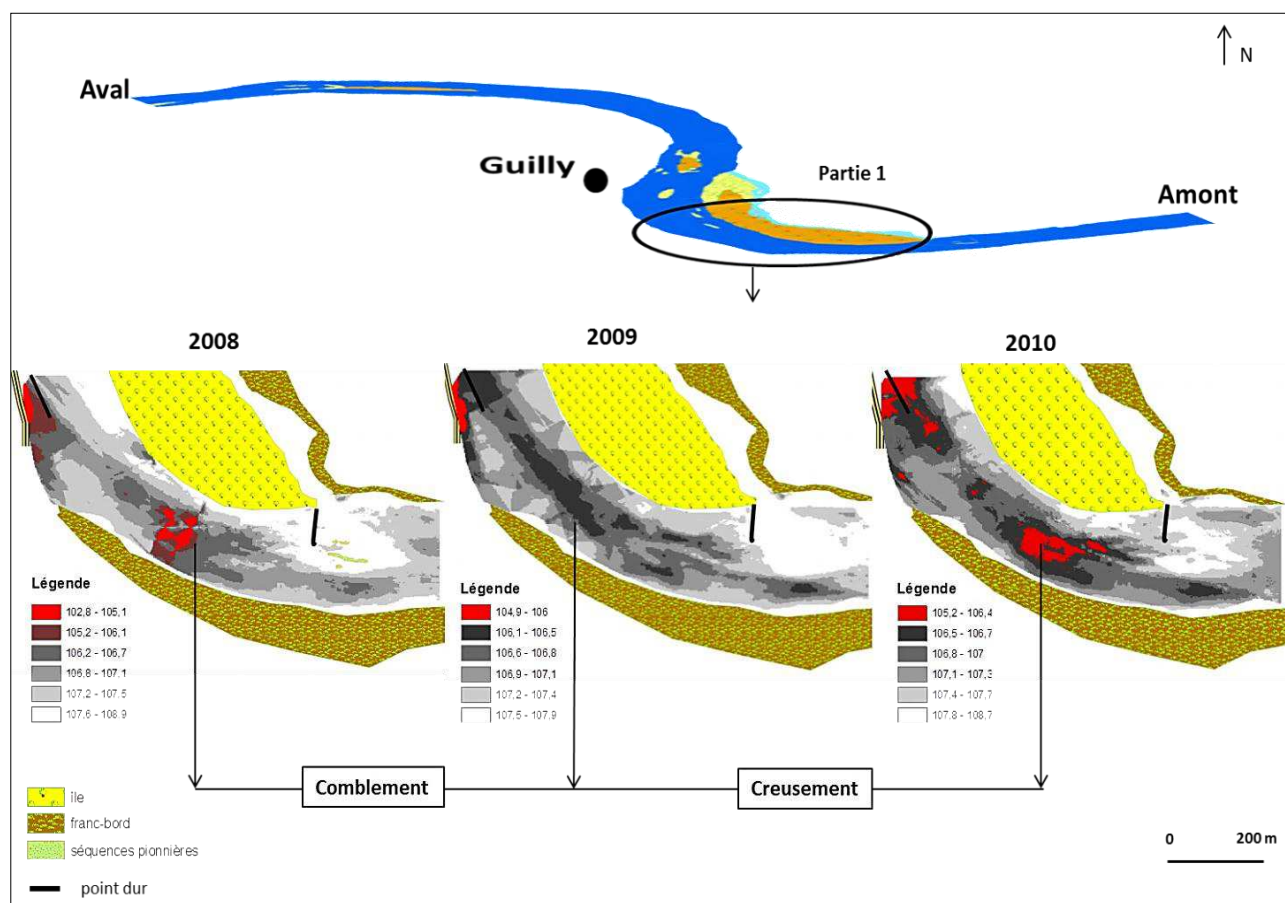


Figure 149. Évolution topographique du plancher alluvial entre 2008 et 2010 (Partie amont).

On constate l'existence de zones préférentielles d'érosion et de sédimentation en dehors des périodes de crues.

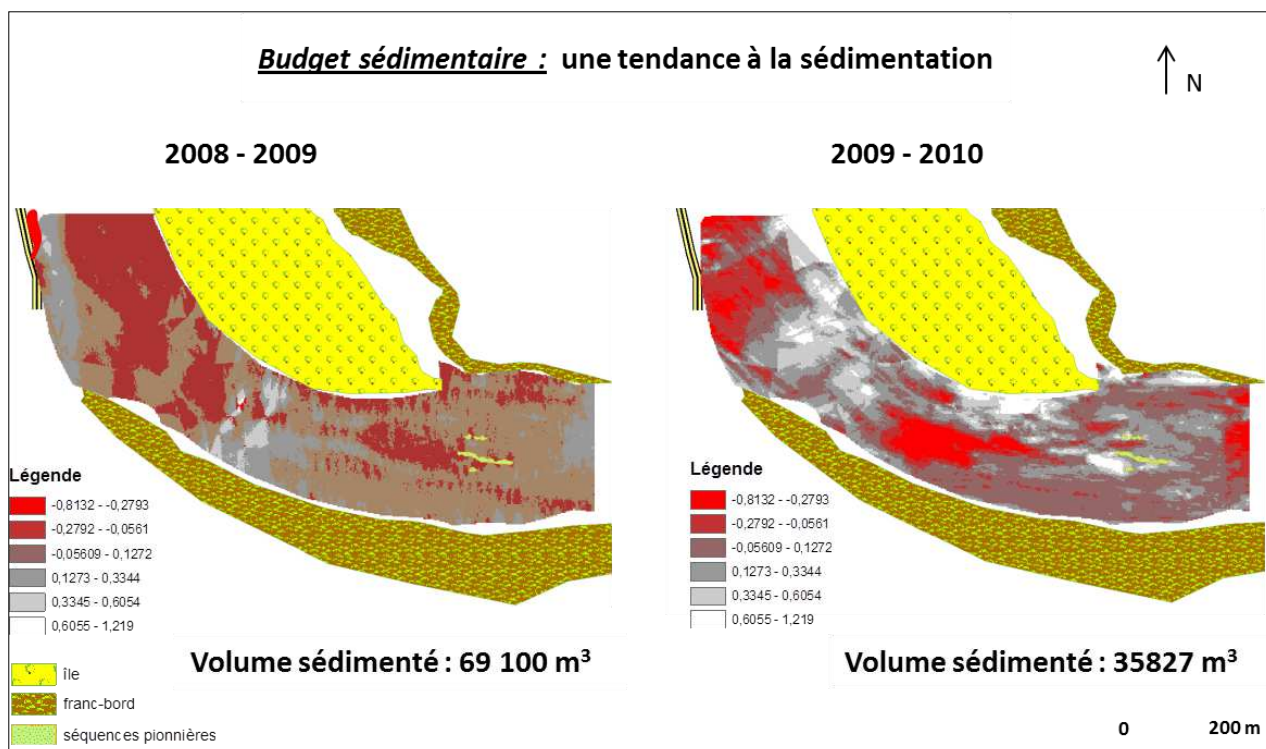


Figure 150. Budget sédimentaire calculé pour les années 2008 – 2009 et 2009 – 2010 dans la partie amont du site atelier de Guilly.

On constate une tendance permanente à la sédimentation.

- **La partie médiane** : ce secteur se situe dans une zone charnière entre la zone amont (de sédimentation) et la zone aval (d'érosion). Le budget sédimentaire calculé pour l'année 2008 -2009 est en faveur de l'érosion. Le volume moyen de la charge solide évacuée est de l'ordre de 55 400 m³. Cette tendance à l'incision se confirme aussi en 2010 avec des valeurs moins importantes que celles calculées pour l'année 2009. Cela met en évidence l'impact morphogène de la crue de novembre 2008. Le volume moyen érodé pour l'année 2009 - 2010 est de l'ordre de l'ordre de 13329 m³.

Les valeurs d'incision les plus importantes sont enregistrées au niveau des mouilles qui se situent en rive droite au niveau du port de Saint Benoît, soit un rythme annuel de 10 cm. On note aussi le rôle important des îles dans la dynamique hydrosédimentaire : réduction de la section mouillée, concentration des eaux en rive droite et piégeage de sédiments. Cette île est renforcée par des enrochements situés en rive gauche où on enregistre la valeur la plus importante de sédimentation, soit 5 cm par an.

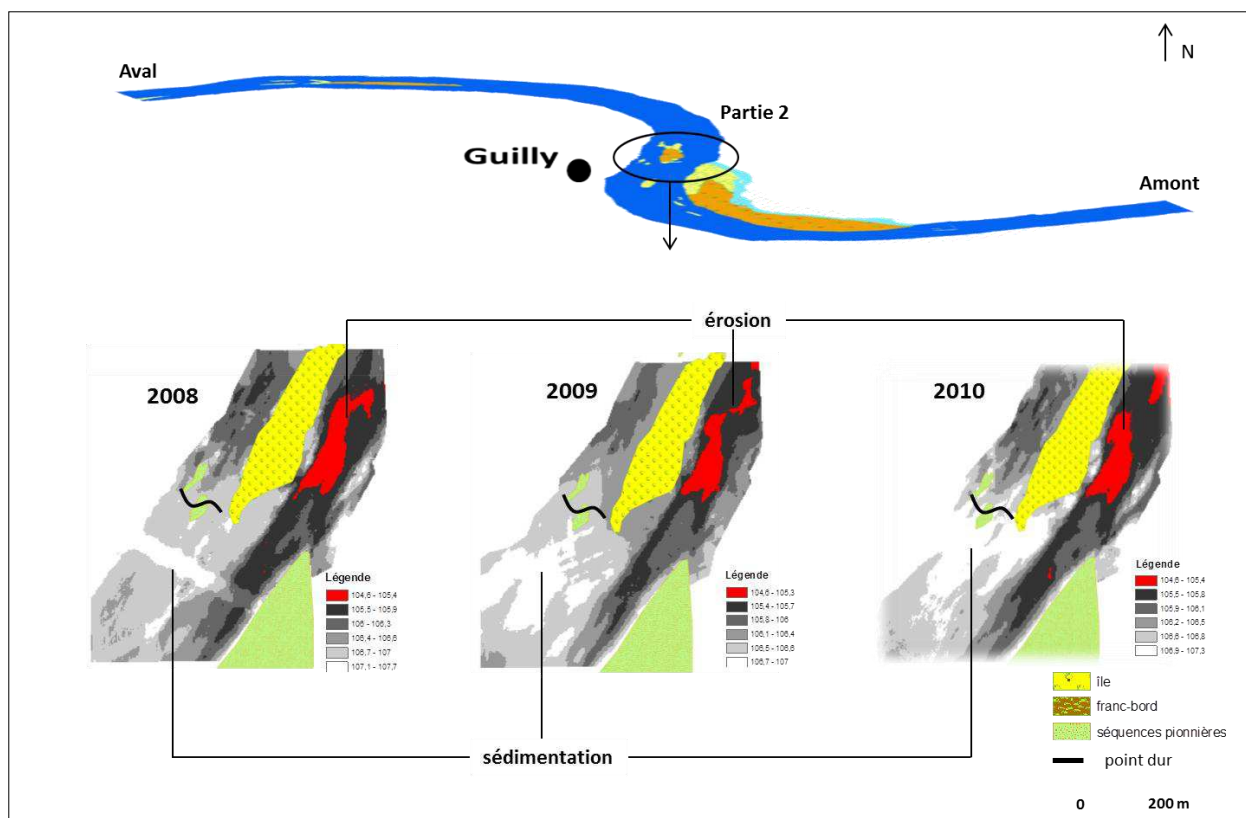


Figure 151. Site atelier de Guilly : évolution topographique du plancher alluviale entre 2008 et 2010 (Partie médiane)

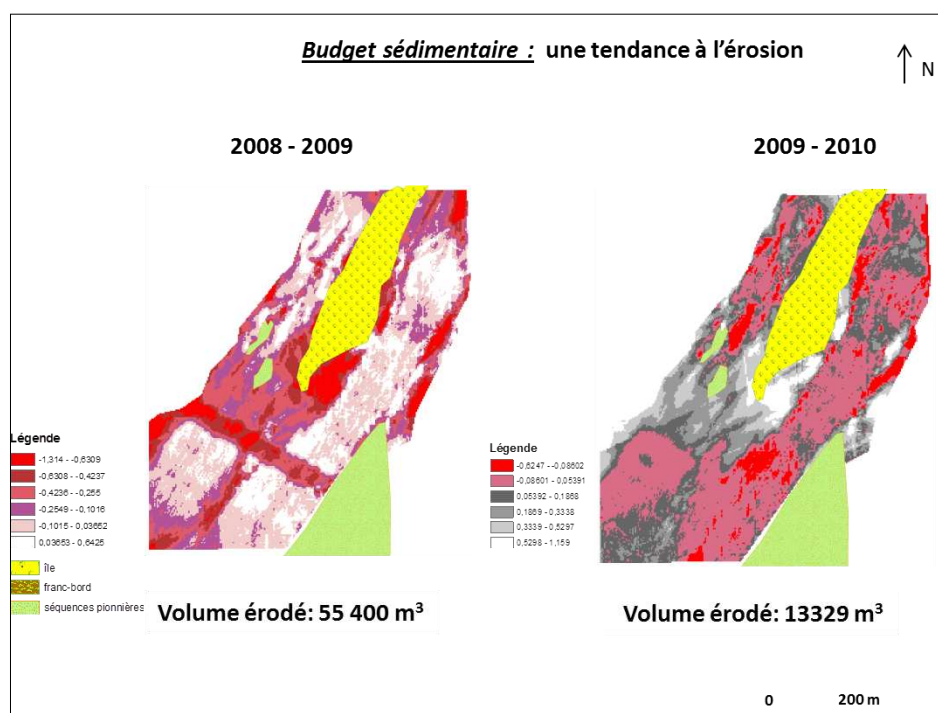


Figure 152. Budget sédimentaire calculé pour les années 2008 – 2009 et 2009 – 2010 dans la partie médiane.

On constate une tendance permanente à l'érosion.

- **La partie aval** : ce secteur se situe dans une à l'extrémité aval du site d'étude au niveau de la mouille situé en rive droite. Le budget sédimentaire calculer pour l'année 2008 -2009 est en faveur de l'érosion. Le volume moyen de la charge solide évacuée est de l'ordre de 24000 m³. Cette tendance à l'incision ce poursuit en 2010. Le budget sédimentaire calculé en 2009 est plus important que celui de 2010 en raison de l'impact morphogène de la crue (augmentation de la capacité de transport et accentuation de l'érosion). Le volume moyen érodé pour l'année 2009 - 2010 représente environ le quart de celui de 2009, soit un volume moyen de l'ordre de 5453 m³.

Les valeurs d'incision les plus importantes sont relevées au niveau de la mouille située en rive droite, soit un rythme annuel de 9 cm. Des palplanches ont été installées dans cette zone afin de protéger la berge contre l'érosion.

On note aussi le rôle important de l'île dans la dynamique hydrosédimentaire : réduction de la section mouillée, concentration des eaux en rive droite et piégeage de sédiments. La stabilité de cette île est renforcée par un seuil dur situé en rive droite. La valeur les plus importantes de sédimentation sont relevées en rive gauche. Le rythme annuel de sédimentation est de 6 cm.

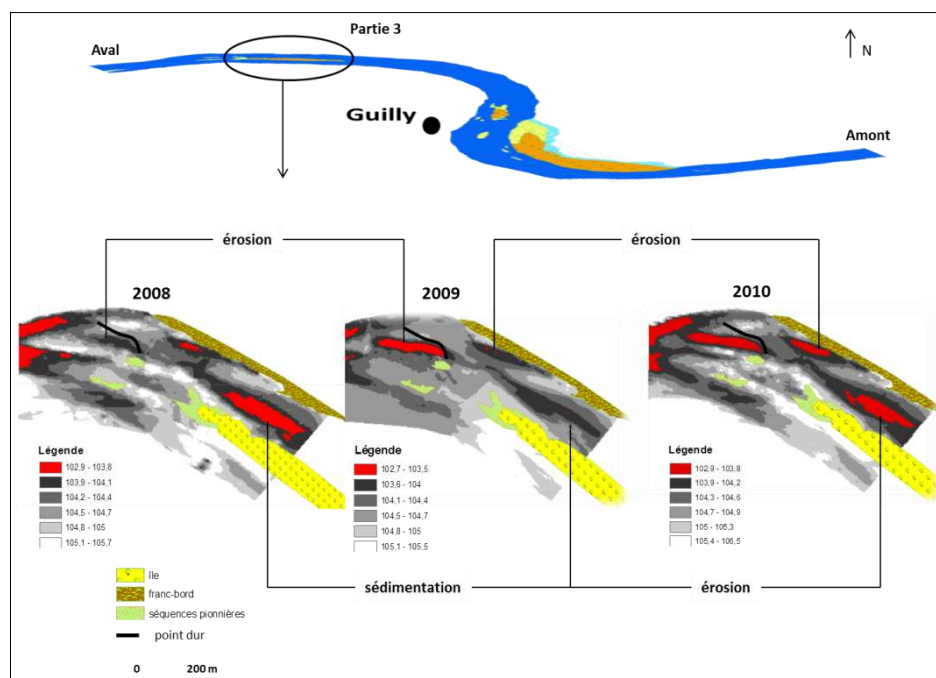


Figure 153. Évolution topographique du plancher alluvial entre 2008 et 2010 (Partie aval).

On constate, d'après le MNT de 2010, une tendance à revenir à la forme topographique de 2008.

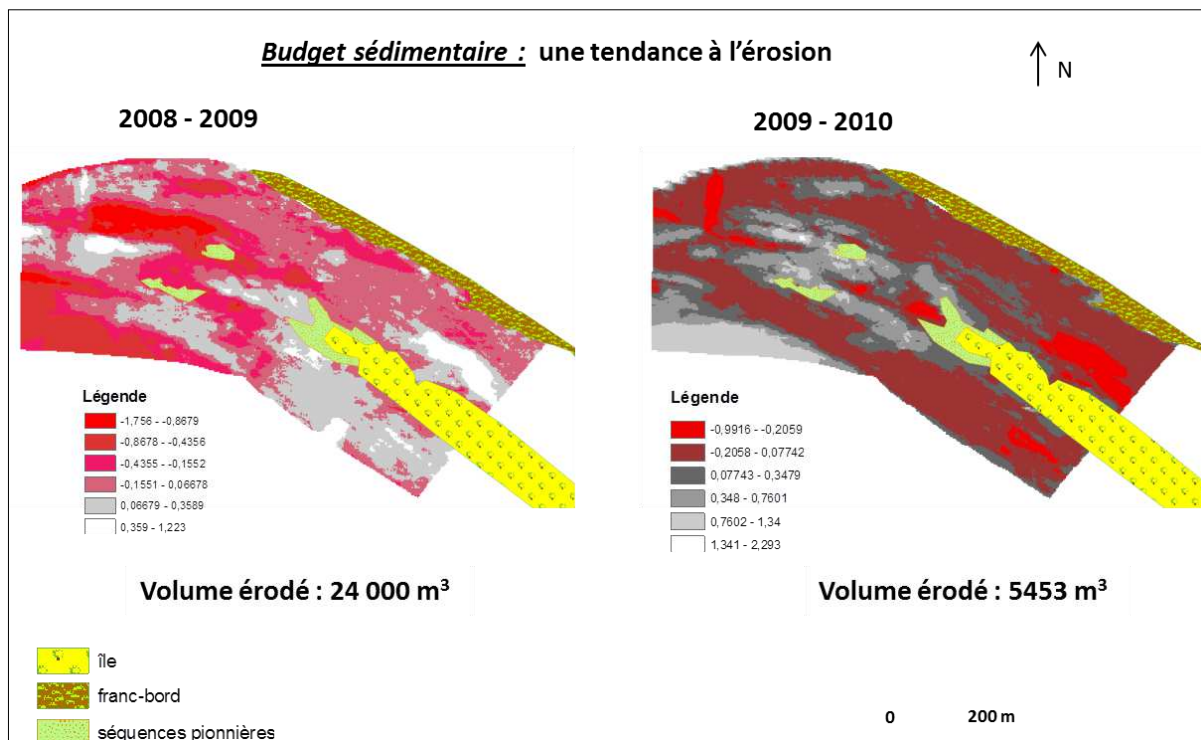


Figure 154. Site atelier de Guilly : budget sédimentaire calculé pour les années 2008 – 2009 et 2009 – 2010 dans la partie aval,

On constate une tendance permanente à l'érosion.

b.2 Actualisation des profils « Crougnaux », analyse topographique à moyen terme

Pour déterminer la tendance d'évolution verticale du plancher alluvial à moyen terme, nous avons comparé des profils transversaux réalisés en 1995 par le bureau d'étude Crougnaux avec les profils réalisés en 2010 dans le cadre de notre travail de thèse. Cela permet d'analyser l'évolution topographique du chenal principal sur un pas de temps plus large que celui de la thèse et d'évaluer l'ajustement du chenal principal sur une période allant de l'année correspondant à l'arrêt des extractions de granulats dans le lit mineur de la Loire à 2010. Cette analyse à grande échelle permet aussi d'appréhender l'impact morphosédimentaire des ouvrages fluviaux conçus au sein du chenal principal.

Les profils « Crougnaux » sont d'une précision métrique alors que la précision des profils réalisés en 2010 est centimétrique. De ce fait, la superposition des profils issus de ces deux campagnes de mesures peut engendrer une surestimation des valeurs de sédimentation et une sous-estimation des valeurs d'érosion. L'analyse de ces résultats fait ressortir principalement les éléments suivant :

D'un point de vue qualitatif, on constate, **un lissage des formes du fond du lit**, cette caractéristique est constaté aussi dans l'analyse des profils de la ligne d'eau (chapitre 3), elle traduit probablement un adoucissement de la pente par érosion progressive (après l'arrêt des extractions du granulat).

Une poursuite de l'incision du lit après l'arrêt des extractions : on enregistre un abaissement d'une valeur moyenne de 58 cm, soit un rythme moyen annuel de 4 cm. Les secteurs qui ont connus une forte érosion se localisent au niveau des deux mouilles : en rive gauche dans la première boucle, dans la zone de transition au niveau de l'île du Port et en rive droite dans la seconde boucle (au niveau de l'île des Boutrons). Les valeurs relevées dans ces zones varient entre 1 m et 2 m, soit un rythme variant de 7 à 12 cm/an. Ce rythme d'incision ne semble pas avoir changé depuis 1995, il est proche du rythme calculé pour la période 2008 – 2010. Les zones concernées par la sédimentation ont connu un rythme d'évolution moyen de 2,7 cm/an.

Par ailleurs, il est probable que la formation et la stabilisation des îles (formées au mieux du lit) favorisent l'accélération du rythme d'incision du lit. Ces formes insulaires se trouvent en aval de seuils rocheux. Les îles du Port et des Boutrons ont connu une extension et un développement de la végétation dans les années 1990. Leur position centrale favorise la répartition du flux liquide (en deux) et la concentration des écoulements en rive droite, c'est dans ces secteurs qu'on relève les valeurs de l'érosion les plus importantes.

Il semble d'après ces résultats que l'incision du plancher alluvial à augmente l'influence des seuils rocheux qui à leur tour en contribuent au développement des îles. L'extension spatiale des îles engendre une réduction de la section mouillée et une accélération des processus d'érosion du lit. La forme sinueuse du lit, la présence de levées, la disposition des seuils rocheux et des îles jouent en faveur de la fixation des zones d'érosion et de sédimentation (création de zones préférentielles).

L'analyse de l'évolution morphodynamique du site atelier des méandres de Guilly met en évidence la tendance d'incision du plancher alluvial et par conséquent une anomalie dans le fonctionnement morphosédimentaire. Elle permet aussi d'établir une hiérarchie des

facteurs aggravants cette incision en fonction de leurs degré d'influence sur la distribution spatial des stocks sédimentaires. On place en premier les anciens aménagements fluviaux conçus au sein du chenal principal (enrochements artificiels : ancien quai). Ces derniers entravent le transit sédimentaire et favorise l'incision des mouilles (fixation des mouilles et création de zone de remous). L'influence de ces seuils durs augmente en fonction du rythme d'incision du plancher alluvial.

A l'aval de ces seuil durs des îles se sont formées et se végétalisent à une vitesse considérable. Une fois qu'elles ont atteint une taille suffisante, les îles induisent une réduction de la section mouillée. La conséquence est donc d'aggraver l'incision.

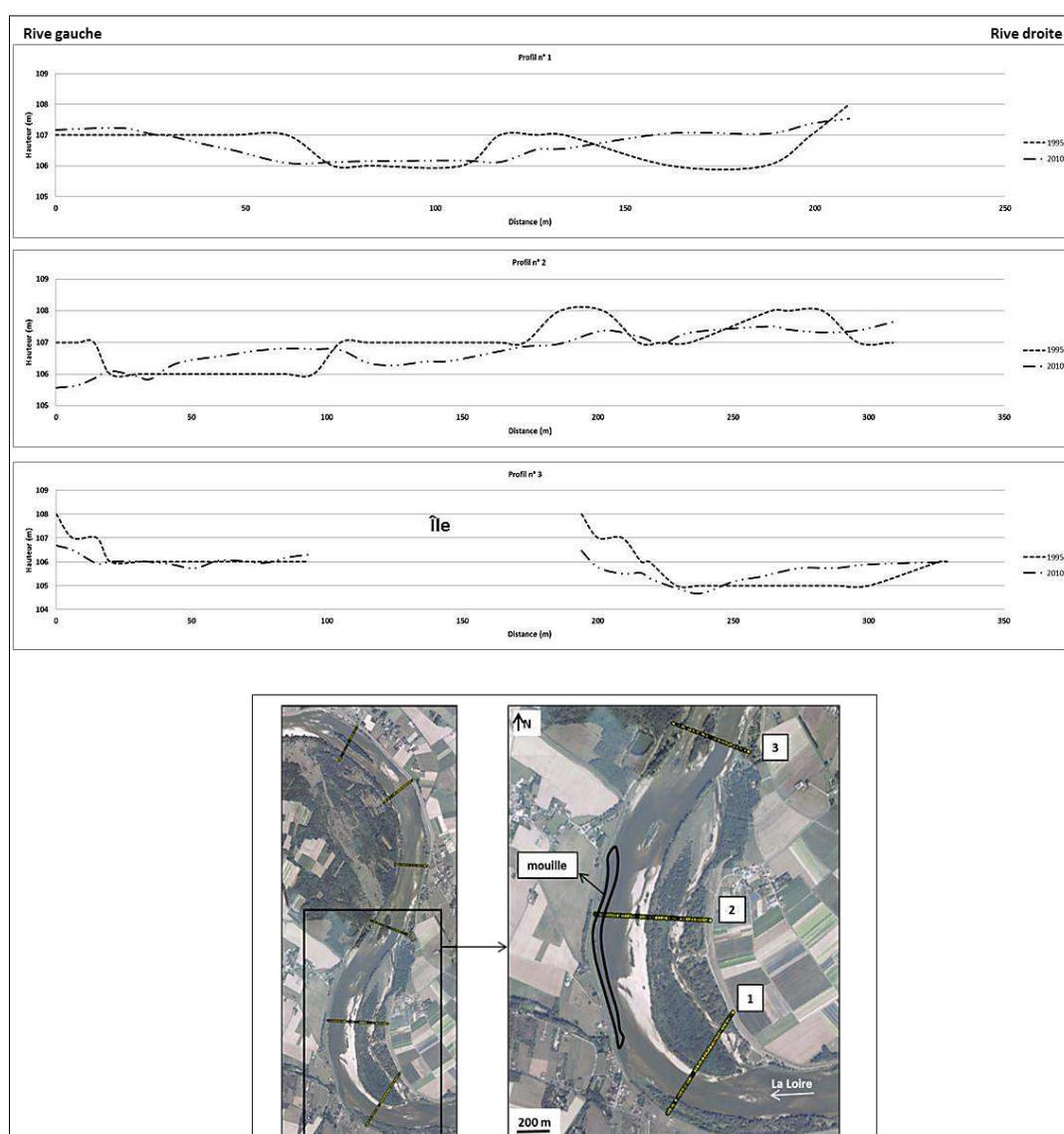


Figure 155. Évolution des profils topographiques transversaux réalisés dans la partie amont du site atelier de Guilly actualisation des profils « Crougnaux » (1995 – 2010).

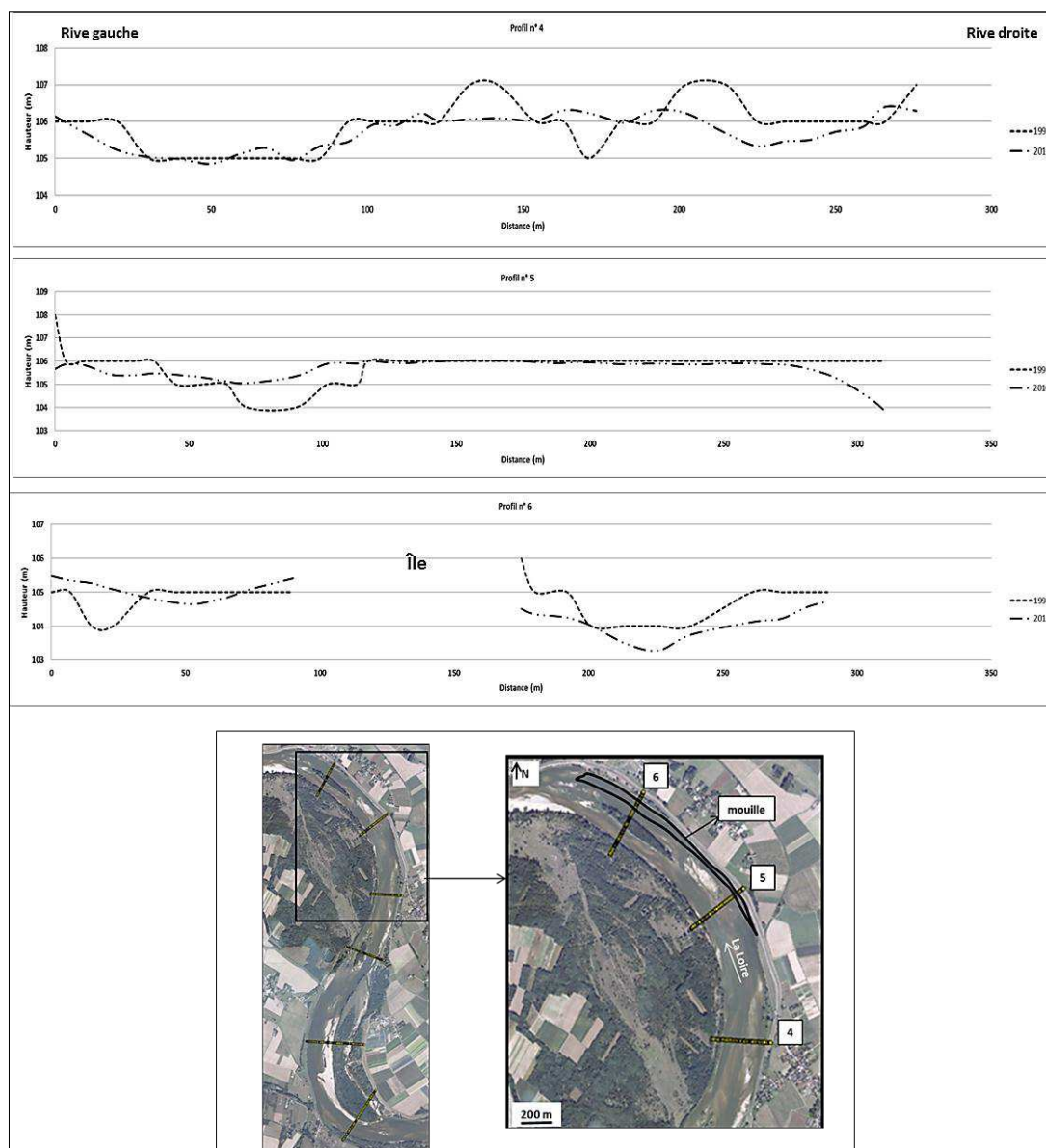


Figure 156. Évolution des profils topographiques transversaux réalisés dans la partie aval du site atelier de Guilly actualisation des profils « Crougnaux » (1995 – 2010).

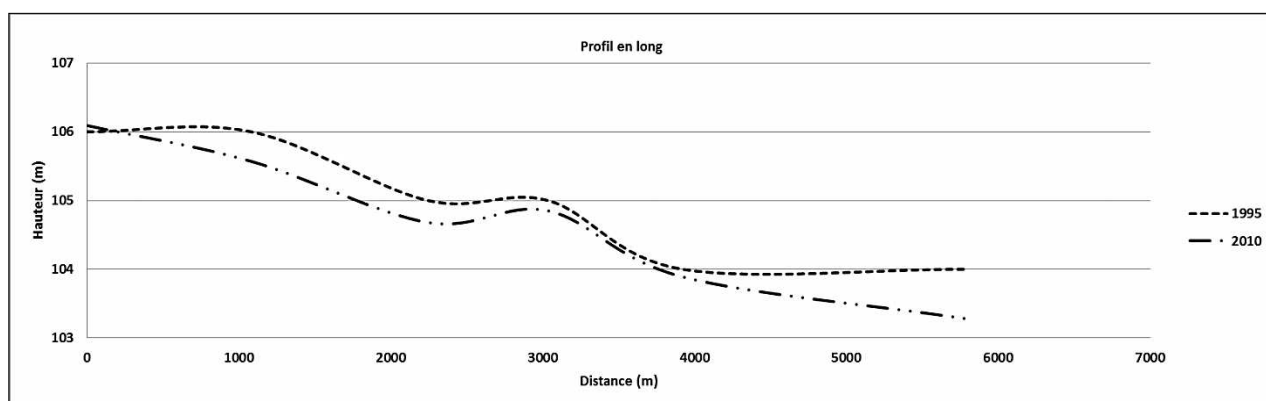


Figure 157. Évolution du profil en long entre 1995 et 2010, site atelier de Guilly.

On constate un abaissement du plancher alluvial sur l'ensemble de la zone d'étude.

c. site atelier de Mesves

c.1 Le chenal principal

Analyse de l'évolution topographique du plancher alluvial, une tendance continue à l'incision

L'incision du lit au niveau de la connexion amont du bras engendre une augmentation du seuil de mise en eau de ce dernier et par voie L'analyse diachronique des profils transversaux réalisés entre 2008 et 2010 nous a permis d'évaluer l'évolution verticale du plancher alluvial et de mettre en évidence l'influence morphosédimentaire de la crue quinquennale de 2008. Les mesures topographiques sont effectuées essentiellement au niveau des connexions amont et aval de la Loire avec le bras secondaire situé en rive gauche. Ces zones de contact sont des points d'influence agissant sur le fonctionnement du bras secondaire (durée de submersion, compétence). Ce protocole de mesure permet à la fois d'analyser l'évolution verticale du plancher alluvial et de déterminer le degré d'influence de la Loire sur l'évolution hydrosédimentaire du bras secondaire.

Le premier constat est la tendance d'incision du chenal principal : on enregistre au niveau de **la partie amont** (pour la période 2008 - 2011) un abaissement du fond du chenal principal d'une valeur moyenne de 75 cm, soit un rythme annuel d'incision d'une valeur de 25 cm. par ailleurs, on remarque que la crue de 2008 a engendré un rehaussement d'une partie du profil n° 1 (d'une valeur moyenne de 1,3 m) en suite un abaissement en 2011 d'une valeur moyenne de 41,5 cm, soit un rythme de 20,7 cm /an. Les profils 2 et 3 ont connus une incision permanente.

de conséquence la réduction de la compétence et de la durée de submersion de ce chenal, ce qui favorise le développement de la végétation.

Au niveau de **la partie médiane**, l'incision atteint une valeur moyenne de 1,07 m soit un rythme annuel d'environ 35 cm. La crue de 2008 à provoquer une accélération du rythme d'abaissement du plancher alluvial.

Les valeurs d'incision les plus importante sont relevées au niveau de **la partie aval**, la compétence de la Loire est probablement soutenue par les apports du Mazou (petit affluent de la Loire) et du bras secondaire. On enregistre pour la période 2008 – 2010 un

abaissement d'une valeur moyenne de l'ordre de 1,4 m, soit un rythme annuel de 49 cm ce secteur a fait l'objet de travaux de restauration consistant à une suppression de la végétation afin de favoriser le transfert de sédiments du bras secondaire vers la Loire. Il semble que ces travaux n'ont pas eu d'effet sur la tendance d'évolution topographie du plancher alluvial. Une zone d'accumulation sédimentaire s'est formée en rive gauche entre 2009 et 2011, la valeur moyenne de sédimentation est de l'ordre de 36 cm, soit un rythme de 18 cm/an.

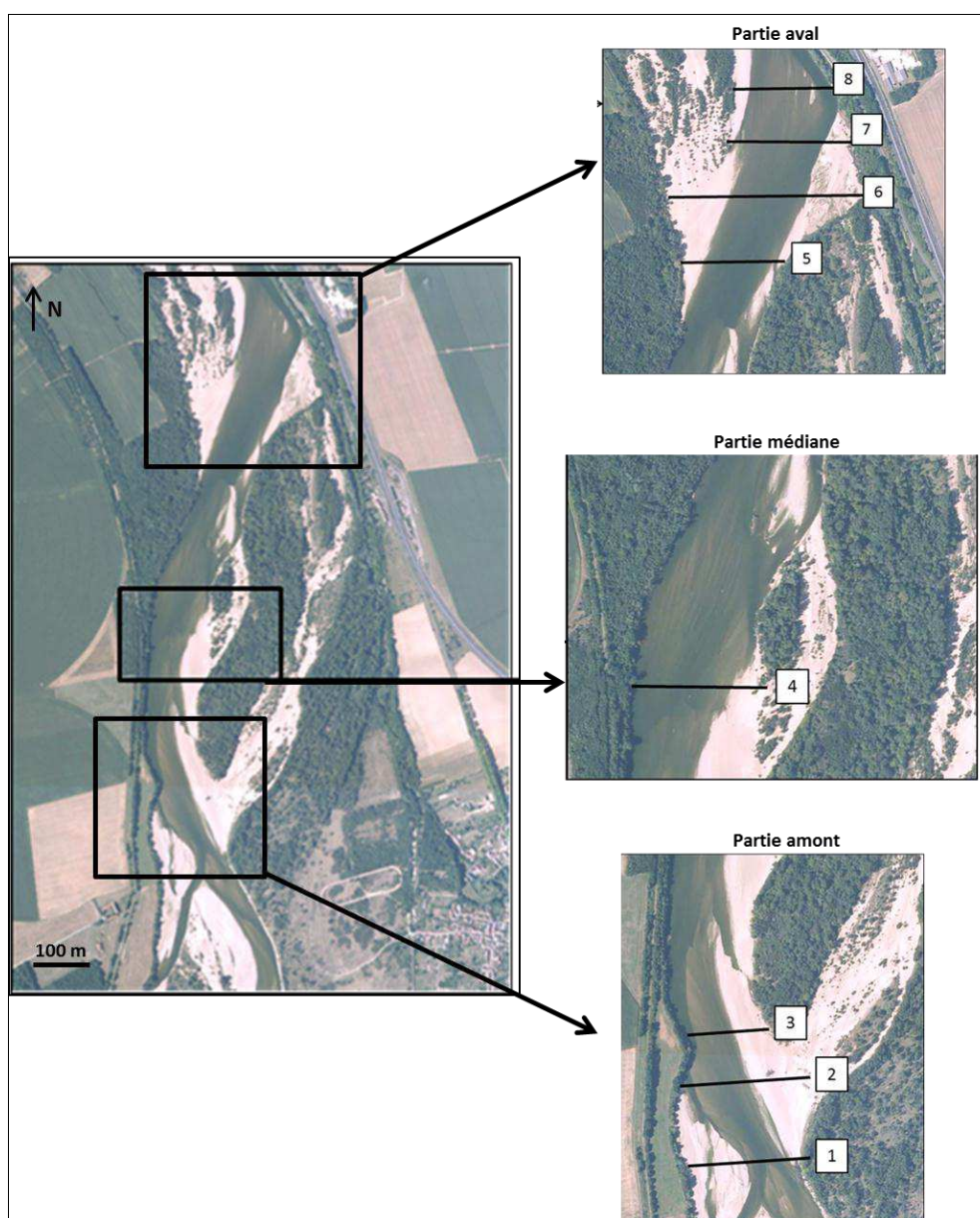


Figure 158. Localisation des profils transversaux réalisés dans le site atelier de Mesves entre 2008 et 2010.

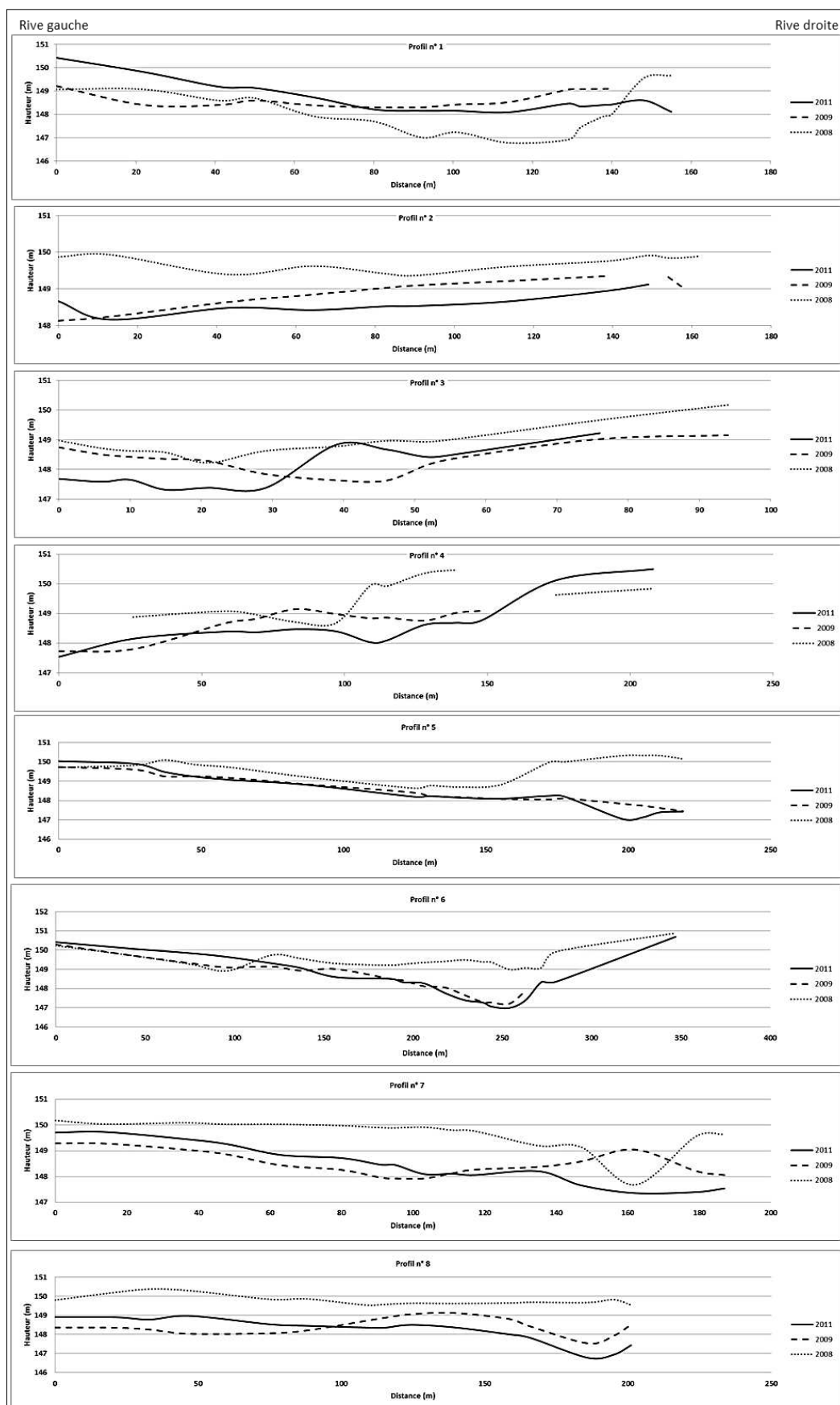


Figure 159. Évolution topographique des profils transversaux réalisés dans le chenal principal, site de Mesves (2008 – 2010)

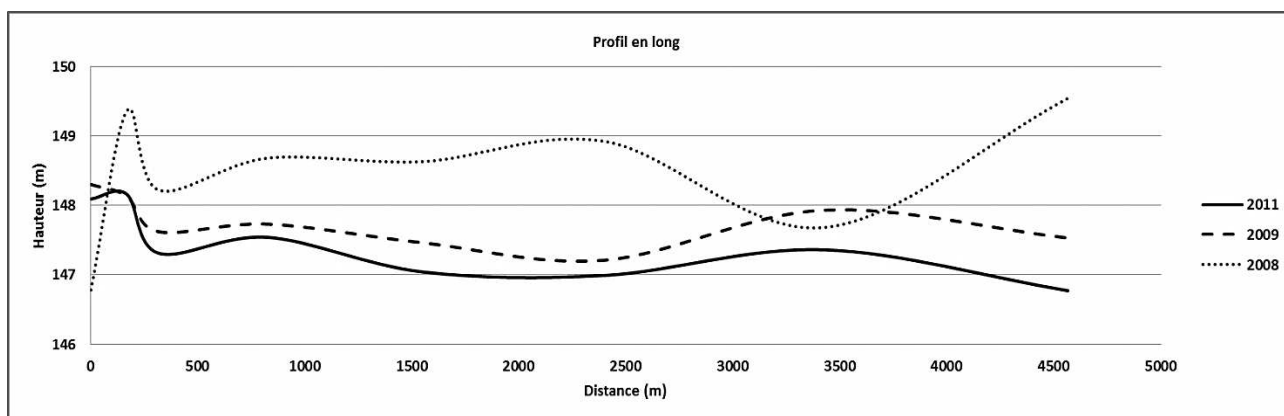


Figure 160. Évolution du profil en long entre 2008 et 2011, site atelier de Mesves.

On constate une tendance permanente à l'incision du plancher alluvial sur la majeure partie de la zone d'étude.

Tableau 23. Synthèse de l'évolution topographique des profils transversaux (2005 – 2011), site atelier de Mesves.

Caractéristiques du transect	Année	
	2009	2011
Longueur totale des zones de sédimentation (m)	216	569
Longueur totale des zones d'érosion (m)	1032	707
Taux moyen annuel de sédimentation (m)	0,25	0,18
Taux moyen annuel d'érosion (m)	1,03	0,26
LTZS / LTZE	0,2	0,8
TMAS / TMAE	0,24	0,69
(LTZS / LTZE) . (TMAS / TMAE)	0,04	0,55
La tendance	érosion	érosion

LTZS : Longueur totale des zones de sédimentation,

TMAS : Taux moyen annuel de sédimentation,

LTZE : Longueur totale des zones d'érosion,

TMAE : Taux moyen annuel d'érosion.

c.2 Le chenal secondaire (rive droite)

Ce bras à fais l'objet d'une analyse topographique réalisée sur un pas de temps de 4 ans (2002 – 2005) par **Grivel (2008)**. Les résultats de cette analyse mettent en évidence : la tendance d'exhaussement et de végétalisation de ce bras secondaire et l'impact morphogène de la crue de 2003. Le passage des crues de décembre 2003 et janvier 2004 établissent un net déséquilibre en déposant plus de 90 000 m³ de sédiments à l'amont et en

retirant plus de 9 000 m³ à l'aval. L'auteur note un déséquilibre entre l'amont et l'aval, d'une année à l'autre (en fonction des événements hydrologiques). Les connexions (amont et aval) alternent entre érosion et sédimentation. L'aval est plus bas mais connaît une forte végétalisation, alors que l'amont reste très perché et se végétalise beaucoup moins. Toute la partie médiane piège les sédiments qui perturbent la pente.

Nous avons effectué un suivie annuelle (2008 – 2010) du secteur ayant fait l'objet de travaux de restauration (connexion aval) et une actualisation des profils transversaux réalisé dans ce bras par **Grivel** en 2004 (sur environ 2 km). Cela afin de prolonger le pas de temps d'analyse jusqu'en 2010.

- la partie amont

Le budget sédimentaire calculé pour l'année 2009 – 2010 fait apparaitre une tendance à la sédimentation. Le volume de la charge solide déposée dans ce secteur est de 9775 m³. Les zones de sédimentation occupent 52 % de ce secteur. Les zones affectées par l'érosion représentent 48 %. L'analyse morphosédimentaire réalisée dans ce secteur par Grivel (2002 – 2005) met en évidence une tendance à l'érosion. Au regard de ces résultats on peut dire que ce secteur a connus des phases de sédimentation et d'érosion contrôlées par les conditions hydrologiques.

- La partie médiane

Ce secteur semble être une zone de stockage de sédiments. Cela en raison du fait du développement de la végétation dans le bras et aussi ça hauteur par rapport au bras principal, le seuil de submersion de ce bras avoisine un débit de 1300 m³.s⁻¹. La comparaison des profils transversaux réalisés en 2004 et 2010 fait apparaitre une tendance à l'exhaussement sur l'ensemble du secteur. L'épaisseur moyenne des sédiments déposés est de l'ordre de 1,82 m, soit un rythme annuel moyen de 30 cm. Les valeurs les plus importantes sont enregistrées au niveau de la moitié aval du bras sur les 900 m précédant la connexion aval.

- La partie aval

Le bilan sédimentaire annuel réalisé au niveau de la connexion aval met en évidence une alternance de phase de sédimentation et d'érosion : on enregistre pour l'année 2008 – 2009

un dépôt sédimentaire de 13405 m³. La surface concernée par la sédimentation occupe 80 % de la surface totale de ce secteur. Les zones affectées par l'érosion représentent seulement 20 %. Cela peut être attribué à l'abondance des apports de sédiments suite à la crue de novembre 2008.

Le budget sédimentaire calculé pour l'année 2009 – 2010 est en faveur de l'érosion. Le volume moyen de charge solide évacuée dans la Loire est d'environ 3842 m³. La surface concernée par la sédimentation occupe 38 % de la surface du secteur. Les zones affectées par l'érosion représentent 62 %. Il semble que les débits proches du plein bord ont favorisé l'érosion dans ce secteur. Ces résultats confirment le mode de fonctionnement hydrosédimentaire évoqué par **Grivel (2008)** : une alternent entre érosion et sédimentation en fonction des événements hydrologiques (figure).

On remarque par ailleurs que le volume de sédiments accumulés en 2009 est supérieur au volume érodé en 2010, on note en moyenne une différence de 9563 m³. De ce fait, la tendance d'évolution morphosédimentaire pour cette période d'étude semble être en faveur de la sédimentation. Cette tendance peut s'inverser dans les années à venir (selon les conditions hydrologiques). La suppression de la végétation pionnière qui s'est développée dans ce secteur depuis 2005 facilitera l'évacuation de sédiments dans le bras principal. Selon **Grivel (2008)**, L'érosion des surfaces boisées sur le banc au niveau de la partie aval, entre 2004 et 2005, s'explique par l'intervention de la DDT chargée de l'entretien du lit de la Loire. L'efficacité de ces travaux semble diminuer avec le temps en raison du développement rapide de la végétation. Les travaux de dévégétalisation devront s'adapter au rythme d'évolution du couvert végétal.

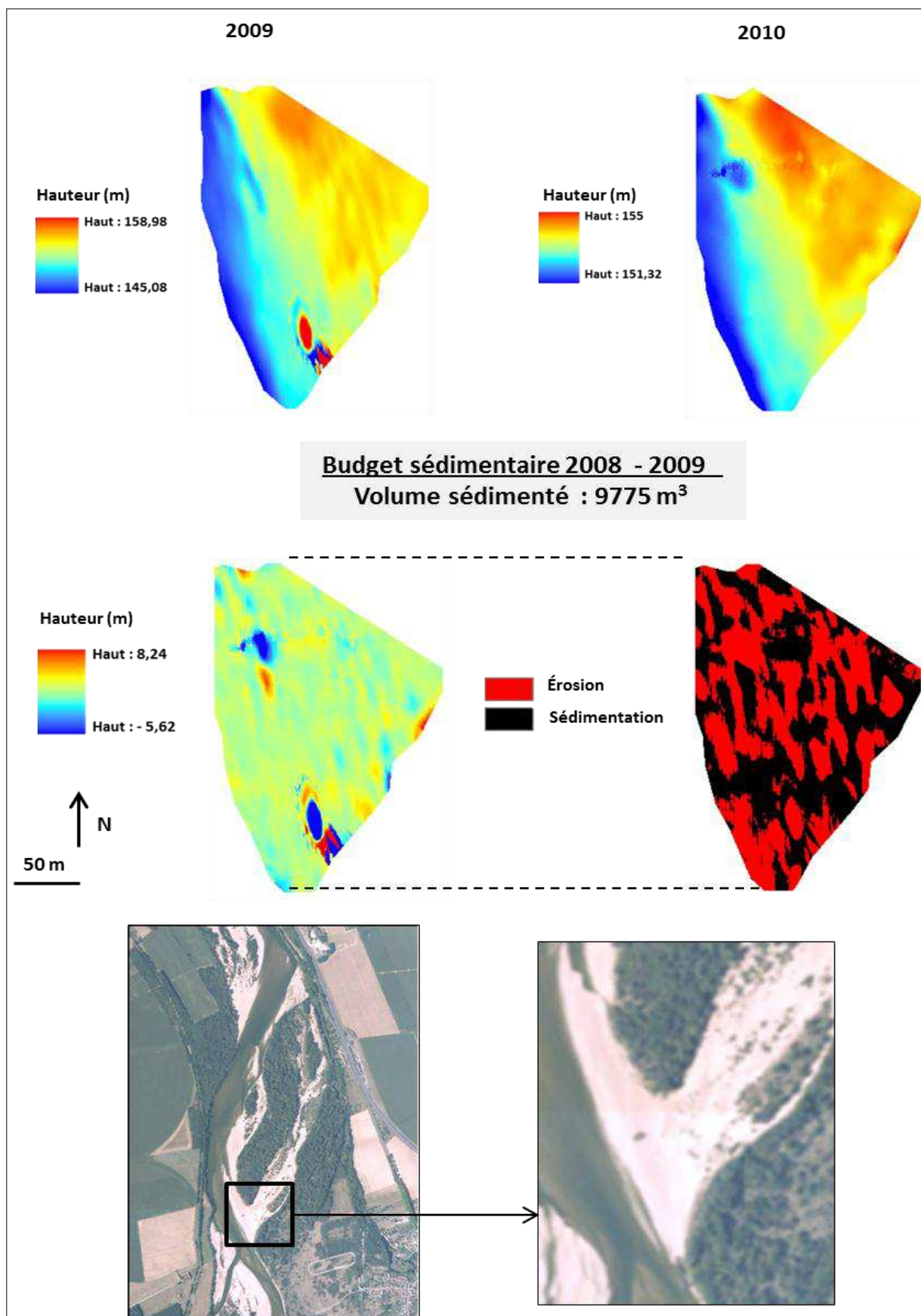


Figure 161. Évolution topographique et calcul du budget sédimentaire pour la période 2009 -2010, partie amont du bras secondaire, site atelier de Mesves.

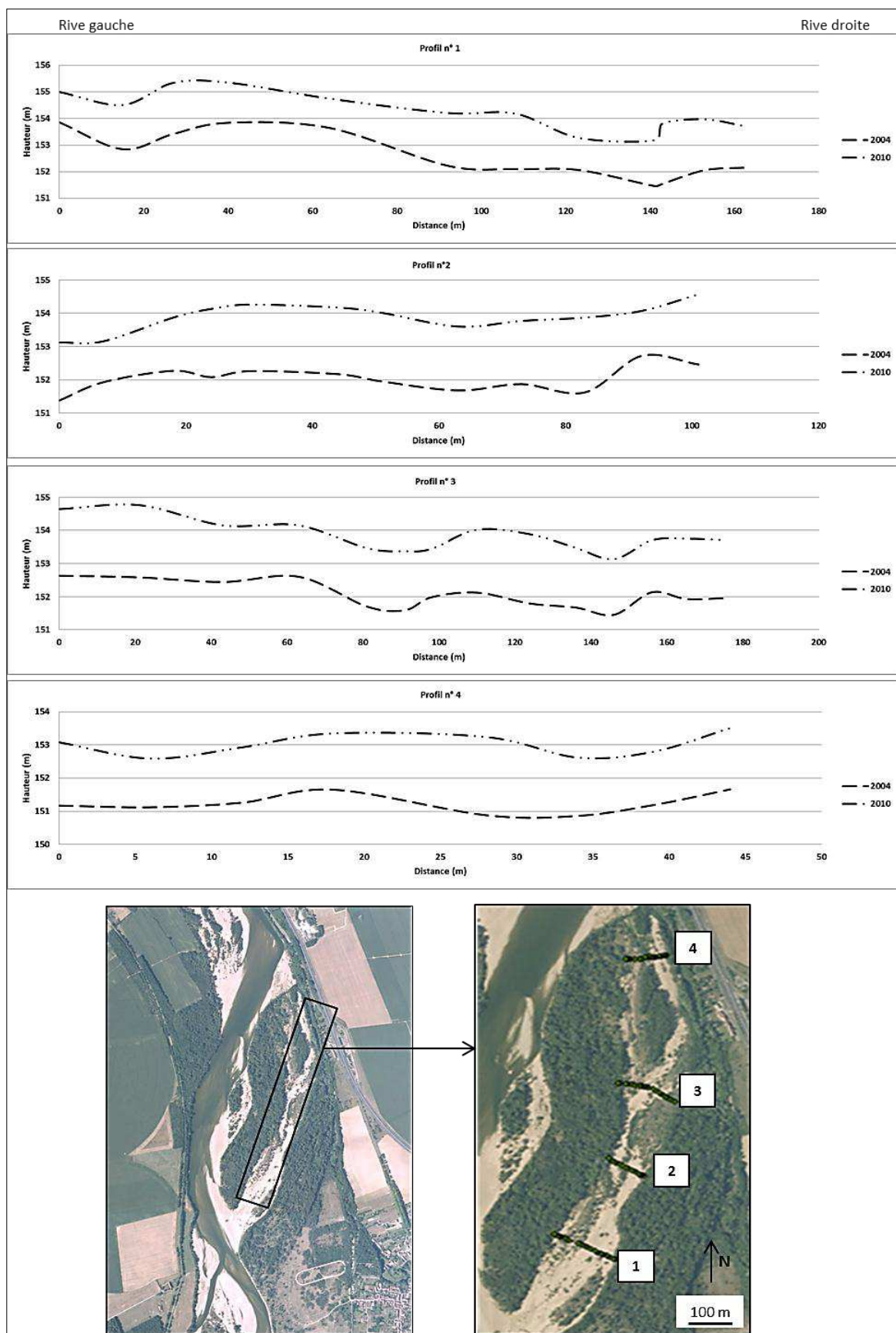


Figure 162. Évolution topographique de la partie médiane du site atelier de Mesves, période : 2004 – 2010.

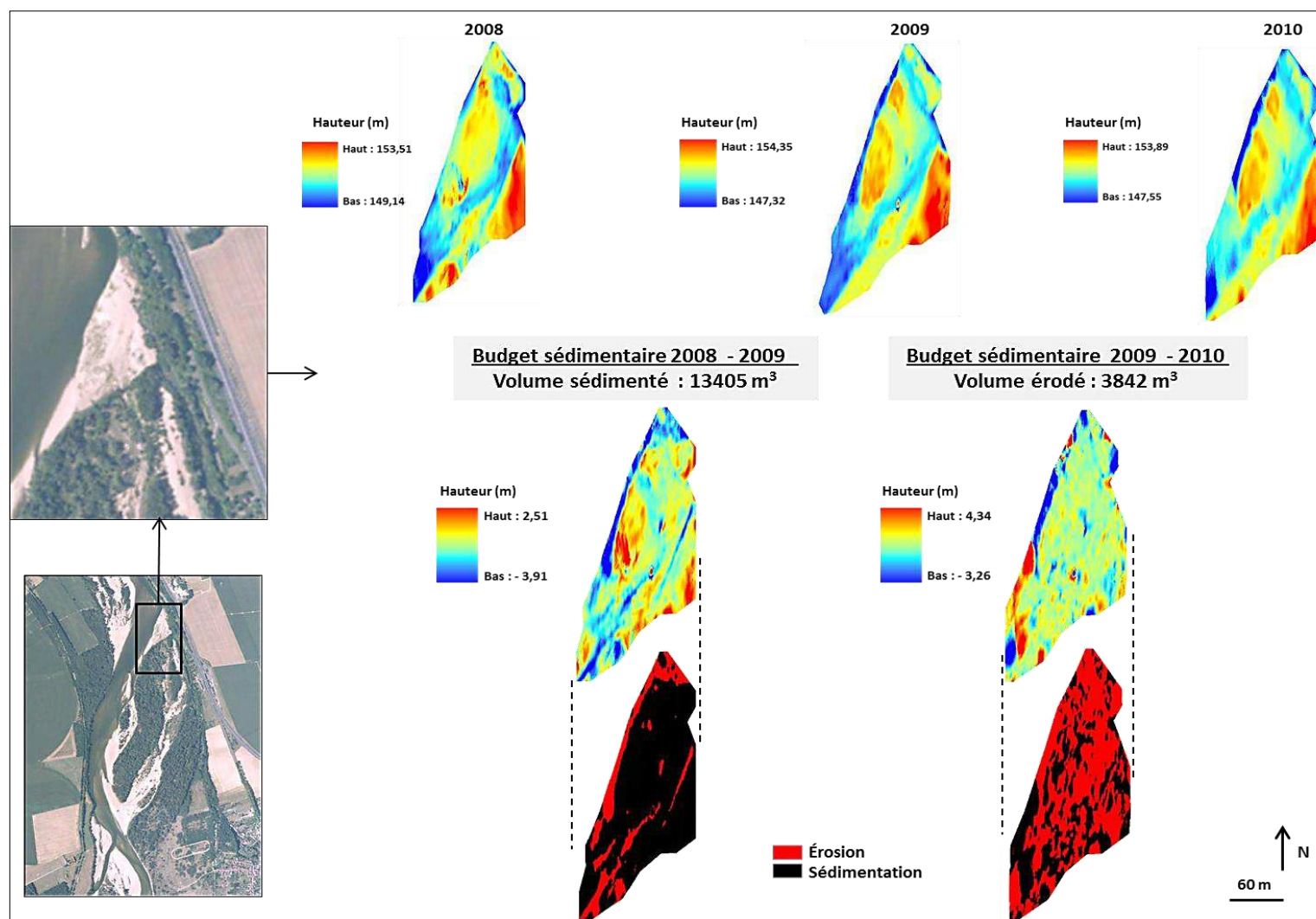


Figure 163. Evolution topographique et calcul du budget sédimentaire pour la période 2008 -2010, partie aval du bras secondaire, site atelier de Mesves

1.2 Analyse de l'évolution des conditions hydrologiques (2007 – 2011)

1.2.1 Déterminer l'influence des évènements hydrologiques sur l'évolution morpho-sédimentaires de la bande active.

Les conditions hydrologiques jouent un rôle important dans le façonnement et l'évolution des lits fluviaux (**Bravard et petit, 1997**). Les crues de fréquences élevées (pleins bords) ou exceptionnels sont susceptibles de produire des modifications morphosédimentaire considérable.

Notre intérêt porte sur les évènements hydrologiques dont les valeurs des débits est supérieur au débit à pleins bords sans pour autant négliger se dernier. Le débit à pleins bords est de l'ordre de $850 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, cette valeur est déterminée à partir des observations sur le terrain et des différentes études réaliser dans ce secteur (**Gautier et al, 2001 ; Grivel 2008**).

Nous utilisons dans cette analyse les *série partielles* des crues : cette méthode consiste à effectuer une sélection (dans l'ensemble des observations) des crues qui sont supérieur à un seuil qu'on peut déterminer de façon arbitraire (**Bravard et petit, 1997**). Dans le cas de cette analyse, le seuil correspond à la valeur du débit à pleins bords. La période d'observation est de 5 années (2007 – 2011), elle correspond à la période d'analyse de l'évolution morphosédimentaire de la bande active au sein de nos sites d'études. **Le croisement de ces deux approches permet de déterminer le rôle morphogène des évènements hydrologiques.** On procède à une classification des évènements hydrologiques en fonction de leur intensité, durée et leurs fréquences. L'objectif est d'analyser l'évolution annuelle de ces crues et la confronter avec les modalités de l'évolution topographique de la bande active.

On dénombre sur l'ensemble de la période d'observation des crues réparties comme suit :

- En 2007 : deux crues de récurrence annuelle survenue en février et mars, la première crue a duré 1 jour, le débit atteint est de $859 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. La seconde à durée 4 jours. Le débit enregistré est de $1480 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Les débits dont la valeur est inférieure au module

représentent la majeure partie des débits de l'année, soit 262 jours. Quant au débit variant entre le module et le plein bord, il concerne une période de 98 jours.

- En 2008 : on enregistre 4 crues de différentes intensités, soit 3 crues de récurrence annuelle et une crue de récurrence quinquennale : deux crues survenue au mois de juin avec un intervalle de deux jours. La valeur des débits atteints est de $1020 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (5 jours) pour la première crue et $942 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (4 jours) pour la seconde. La crue quinquennale a eu lieu en novembre, elle a duré 5 jours. Le pic de la crue est de $2260 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Enfin, la dernière crue de récurrence annuelle est survenue en décembre, la valeur du débit enregistré est de $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (2 jours). La durée des débits inférieurs au module est de 202 jours. Quant au débit variant entre le module et le plein bord, il concerne une période de 148 jours.

- En 2009 : deux crues de récurrence annuelle survenue en janvier et février. La première crue à durée 3 jours, le débit atteint est de $1070 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. La seconde à durée 4 jours. Le débit enregistré est de $869 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. La durée des débits inférieurs au module est de 300 jours. Quant aux débits variant entre le module et le plein bord, il concerne une période de 61 jours.

- En 2010 : on dénombre 5 crues de récurrence annuelle, la première a eu lieu en janvier. Le débit enregistré est de $959 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (1 jour). La seconde s'est produite en juin, le débit enregistré est de $900 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (1 jour). La troisième crue est survenue au mois de novembre, elle a duré 3 jours, le débit enregistré est de $1120 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Les deux dernières crues en eu lieu en décembre avec un intervalle de 12 jours. Les débits relevés sont $1490 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (5 jours) et $1420 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (4 jours). La période relative aux débits inférieurs au module est de 234 jours. Les débits variant entre le module et le plein bord s'étale sur une période de 61 jours.

- En 2011 : on note seulement une seule crue qui a duré un jour en décembre, le débit relevé est de $870 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Les débits inférieurs au module concernent une période de jours 319 jours. La durée des débits variant entre le module et le plein bord est de 45 jours.

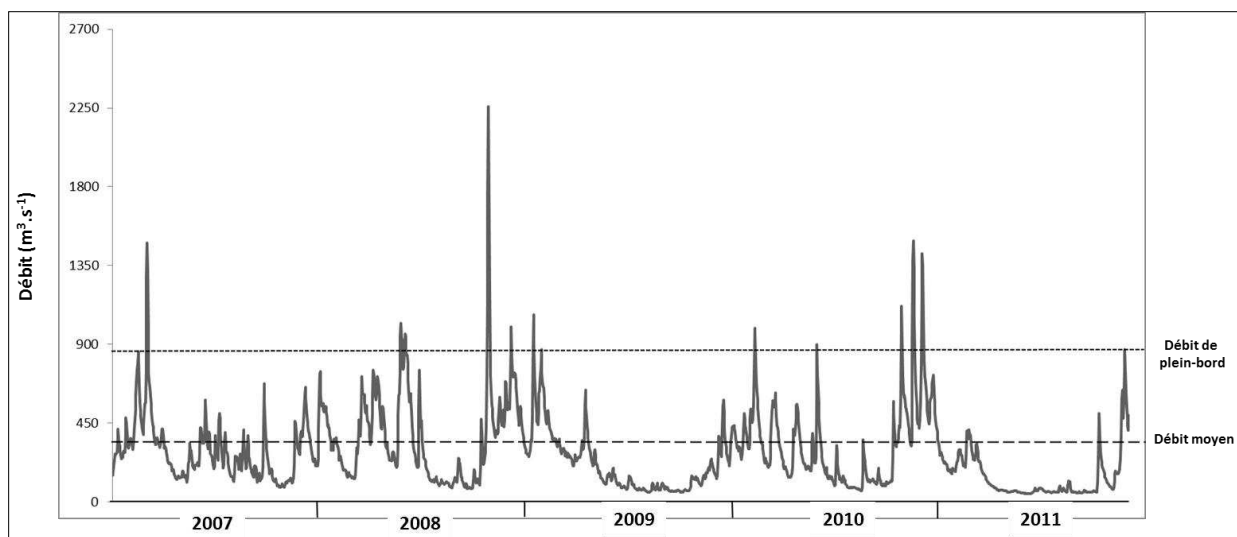


Figure 163. variation des débits moyen journaliers et repérage des crues. Période d'observation 2007 – 2011.

Le module et le débit à pleins -bords sont fixés respectivement à 350 et 850 m³.s⁻¹ (station de Givry).

Tableau 24. Evolution du nombre de jours des différentes classes de débits (2007 – 2011).

Année	Nombre de jours des différentes classes de débits (m ³ .s ⁻¹)				
	< 350	350 - 850	850 - 1600	1600 - 1800	1800 - 2500
2007	262	98	5		
2008	202	148	13	2	1
2009	300	61	4		
2010	234	116	15		
2011	319	45	1		

On constate d'après ces résultats une variation interannuelle de la fréquence et de l'intensité des crues. Les années 2008 et 2010 (et dans une moindre mesure 2007) se caractérise par une intensité et une fréquence plus importante des débits morphogènes. On enregistre 4 crues dont une crue quinquennale en 2008 et 5 crues en 2010. Les débits proches du plein bord représentent une période proche de 4 mois par an. Les modifications morphosédimentaires de la bande active sont susceptible de se produire au cours de ces épisodes hydrologiques (Tricart, 1977 ; Dury 1969). Le débit à pleins bords est considéré comme proche du débit dominant susceptible de mettre en mouvement la charge de fond (Bravard et petit, 1997). En revanche, les années 2009 et 2011 semble être

d'une intensité hydrologique plus faible, les débits inférieurs au module représentent une période d'environ 10 mois par an. Les crues sont d'une intensité et d'une fréquence relativement faible : deux crues en 2009 et une crue en 2011 (débit avoisinant $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Ce constat apporte des éléments d'explication et de compréhension de l'évolution topographique de nos sites d'études. La tendance d'incision du plancher alluvial semble être étroitement liée à la fréquence du débit à pleins bords et des crues annuelles. L'incision du plancher alluvial est constatée dans nos sites d'étude suite à ces événements hydrologiques (en 2009 en raison des crues enregistrées en 2008 et en 2010 suite aux crues survenues en 2010).

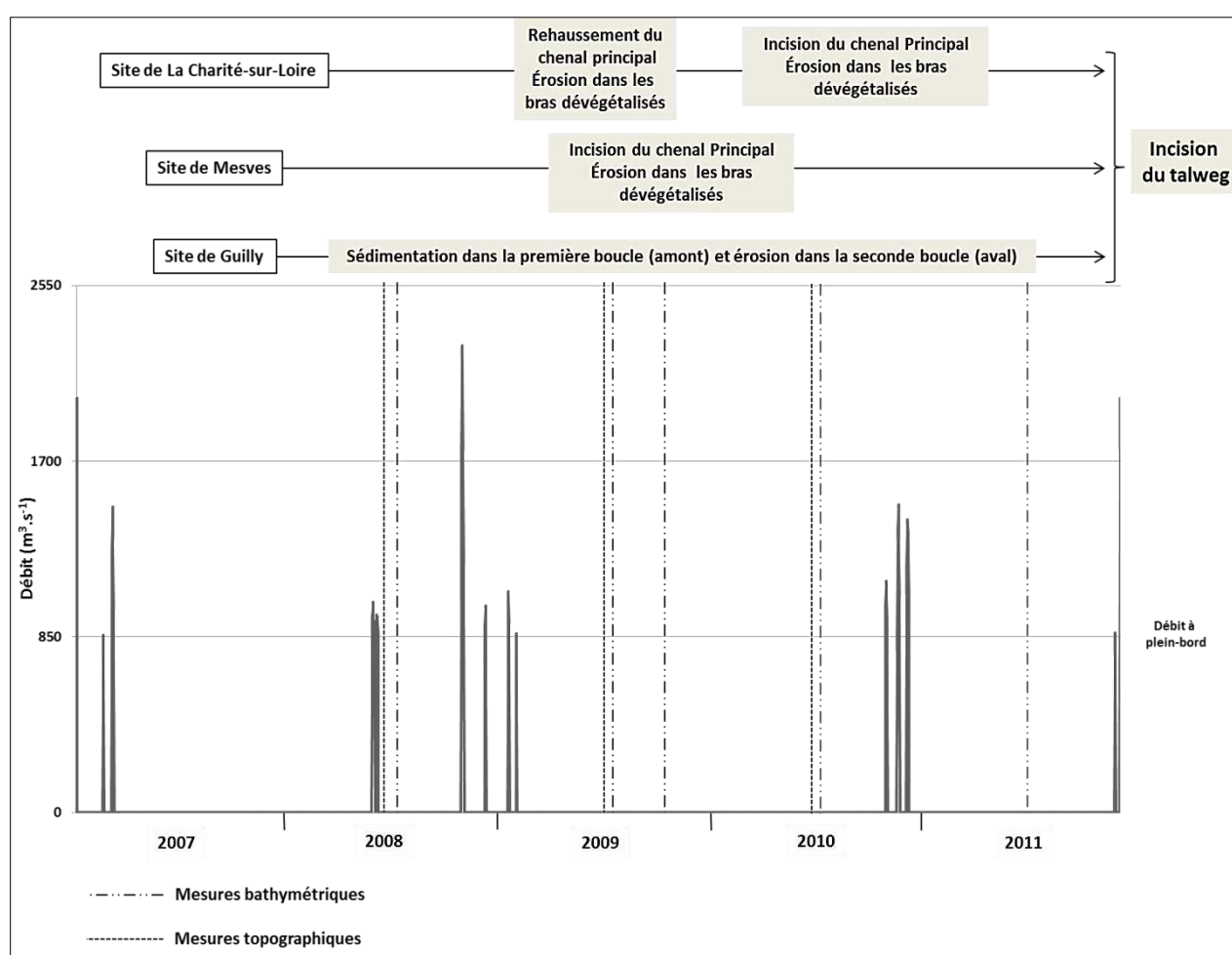


Figure 163. Mise en relation des événements hydrologiques, dates des campagnes de mesures topographiques et bathymétriques ainsi que les résultats.

Les années au cours desquelles enregistre plus de crue sont : 2008 et 2010.

1.2.2 L'influence des débits liquides sur l'évolution de la charge solide en suspension dans le chenal principal

La capacité de transport solide a augmenté de façon significative pendant la crue survenue en novembre 2008. Nous avons effectué au cours de cette crue des mesures de la charge solide transitant en suspension sur une profondeur de 50 cm. Cette charge solide atteint une valeur de 239 mg/l, soit environ 20 fois la charge transporter pour un débit équivalent au module (10 mg/l pour les 15 premiers centimètres) et fois la charge transporter pour une crue de (mg/l). Le pic de concentration de MES est atteint le 2^{ème} jour de la crue à 8 heures alors que le maximum moyen des débits est enregistré le 2^{ème} jour vers 14 heures à la station de Givry (m). Nous avons relevé sur l'échelle de la Charité le niveau d'eau le plus haut à 22 heures (voir figure). Cela signifie que le pic de MES a précédé le pic de crue de 19 heures (voir figure). Des mesure similaires de MES ont été relevés par **Grivel, (2008)** à Pouilly pendant la crue de 2003 (à environ 15 km en aval de la Charité). La crue de décembre 2003 apparaît comme un événement historiquement très important, (le pic de crue est de $3\,350\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) soit la troisième crue la plus importante depuis 1872 ($4\,050\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) et celle d'octobre 1907 ($4\,150\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Si on compare le débit la crue de 2003 avec celui de la crue 2008 on constate une différence $1090\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Cependant les pics de concentrations de M.E.S sont d'une valeur très proche : 240 mg/l pour la crue de décembre 2003 et 239 mg/l pour la crue de novembre 2008. Les mêmes mesures de concentration de M.E.S sont effectuées lors de la crue de février 2003 ($2090\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) dont le pic est proche de celui de la crue de novembre 2008, mais le pic de concentration de M.E.S relevé lors de la crue de février 2003 n'excédait pas les 50 mg/l, soit environ le quart de la valeur enregistré pour la crue de 2008. Ces résultats expriment le caractère irrégulier du transport de M.E.S par rapport aux fluctuations des débits. Cette disparité des concentrations en M.E.S est constatée aussi pour des débits inférieurs à $1000\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. L'analyse effectué par **Grivel (2008)** sur les données de M.E.S de la Centrale EDF de Belleville (2001-2005) met en évidence pour des débits variant d'un gradient de 1 à 3, les mêmes concentrations sont enregistrées (par ex. 50 mg/l sont enregistrés pour des débits de $100\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et $300\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

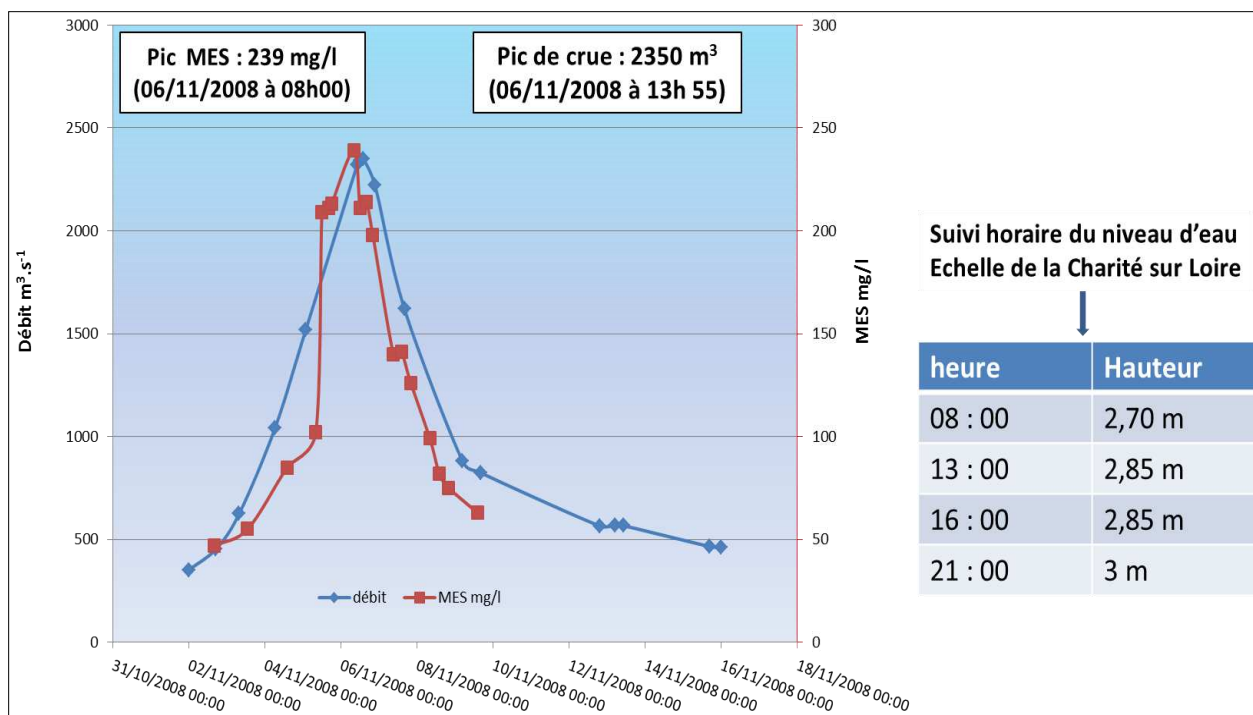


Figure 164. Évolution des débits et de la concentration des Matières En Suspension lors de la crue de novembre 2008.

Les mesures sont réalisées au pont de La Charité-sur-Loire sur les 50 premiers cm de la colonne d'eau. La concentration de MES augmente considérablement en période de crue, le Rapport concentration de MES crue / MES débit moyen est d'environ 20.

1.2.3 L'évolution transversale et verticale des concentrations de M.E.S en fonction des débits

Nous avons effectué un suivi assez fin des Matières En Suspension (M.E.S.) sur toute la colonne d'eau au niveau d'une section transversale dans le site de la Charité sur Loire. Les mesures ont été réalisées au cours de l'année 2010 pour des débits variant entre 142 et 982 m³.s⁻¹. Cela afin d'analyser la variation verticale et transversale des concentrations de M.E.S. Les résultats obtenus mettent en évidence la formation d'un gradient « verticale » des concentrations des matières transportées en suspension à partir d'un débit égale à 302 m³.s⁻¹, soit une valeur proche du débit moyen. Cet écart est bien marqué pour les prélèvements effectués au milieu du chenal et en rive droite : les valeurs des concentrations de M.E.S issus des prélèvements effectués à une profondeur de 15 cm représente 1/7 des valeurs issus des prélèvements réalisés à des profondeurs de : 80 à 95 et 130 à 150 (de 10 à 70 mg/l).

Pour un débit égal à $594 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, les valeurs de concentration de M.E.S sont proches sur toute la colonne d'eau, soit une valeur avoisinant les 50 mg/l . les valeurs les plus importantes sont enregistrée au niveau des deux rives (plus en rive droite) à une profondeur de 80 à 95 cm.

A $982 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, le poids des masses sédimentaires transportées en suspension varie entre 40 et 60 mg/l . les valeurs les plus importantes sont enregistrée au milieu du chenal à une profondeur de 80 à 90 cm (voir figure). On distingue clairement pour ce débit un gradient de concentrations en M.E.S. les concentrations de cette masse solide augmentent des berges vers le centre du chenal et de la surface vers une profondeur d'environ 95 cm (et diminuent à partir de cette profondeur). Une étude plus détaillée concernant la variabilité spatio-temporelle de la charge en suspension a été menée sur le Rhône. Cette étude met en évidence une répartition spatiale des concentrations en M.E.S suivant le même gradient de concentration (pour un débit de $2833 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, décrue cévenole) (**Antonelli et Provansal, 2002**), la répartition spatiale de M.E.S peut être expliquée par les inégalités des vitesses d'écoulement au sein de la section transversale du cours d'eau (voir figure).

Sur la Loire, en ce qui concerne l'évolution transversale de la masse solide transportée par suspension, la variation des débits engendre (sur la section transversale) :

- à une profondeur allant jusqu'à 15 cm, une croissance des concentrations à partir de $594 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Les valeurs moyennes enregistrées pour des débits variant entre 142 et $302 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ sont respectivement 4 et 10 mg/l alors qu'on relève pour un débit de $594 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ une valeur de $48,2 \text{ mg/l}$, (environ 5 fois la valeur relevée pour un débit de $302 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Les valeurs enregistrées pour le débit de $982 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ sont proche de ceux relevés pour le débit de $594 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (45 mg/l).
- à une profondeur variant de 80 à 95 cm, la valeur moyenne des concentrations de M.E.S restent faibles pour le débit de $142 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, soit environ 5 mg/l . pour un débit de $302 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ la masse solide transporté en suspension présente un gradient transversale bien marqué : en rive gauche les valeurs de M.E.S reste faible (11 mg/l), aux milieux du chenal et en rive droite, la concentration de M.E.S atteint des valeurs respectives de 72,9 et 52,8

mg/l. La valeur la plus importante est enregistrée au milieu du chenal (mg/l pour un débit de $302 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

- à une profondeur variant de 130 à 150 cm, l'évolution transversale de M.E.S ne connaît pas de changement important par rapport au mode d'évolution et à la valeur moyenne des concentrations relevées à une profondeur variant de 80 à 95 cm. Les valeurs moyennes varient entre 43 et 54 mg/l pour les débits respectifs : 594 et $982 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. La valeur la plus importante est enregistrée au milieu du chenal (70 mg/l pour un débit de $302 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

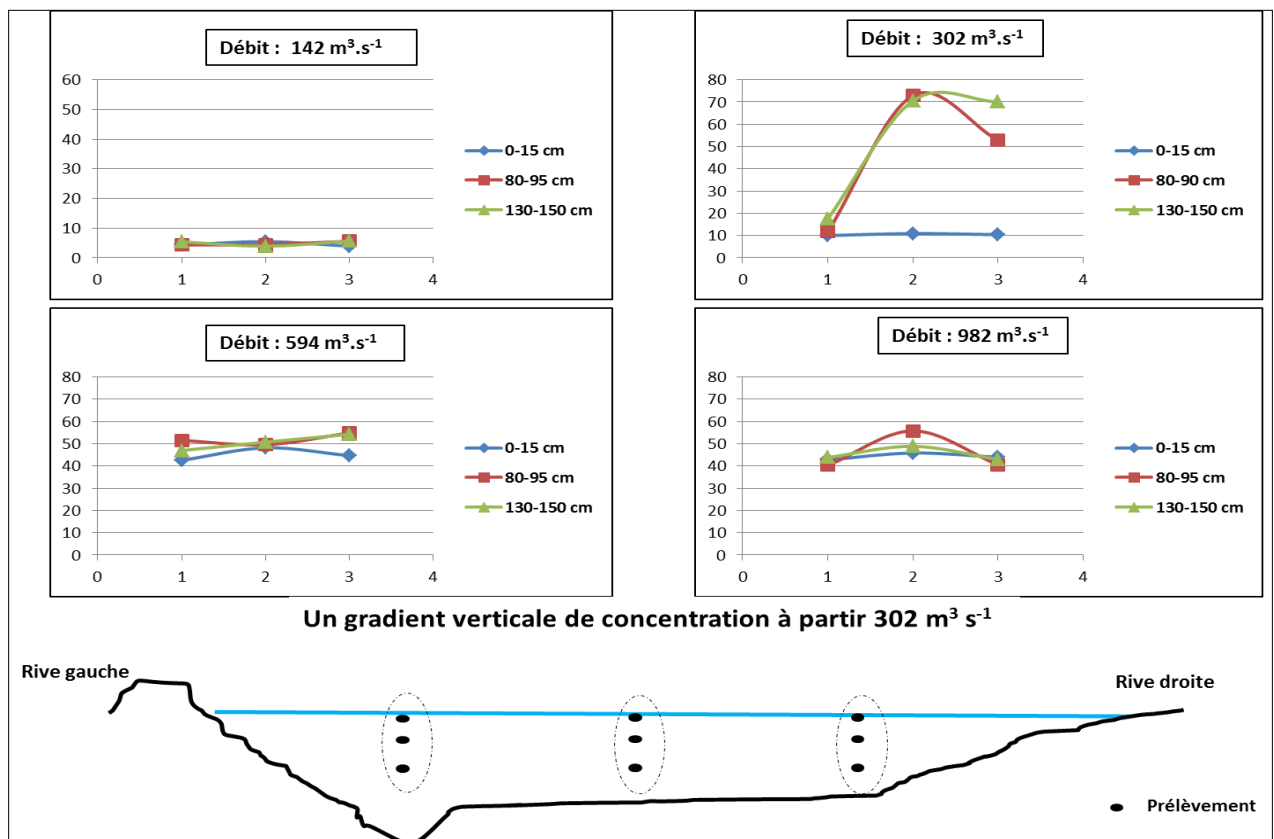


Figure 165. Évolution verticale des concentrations de M.E.S en fonctions des débits (Q)

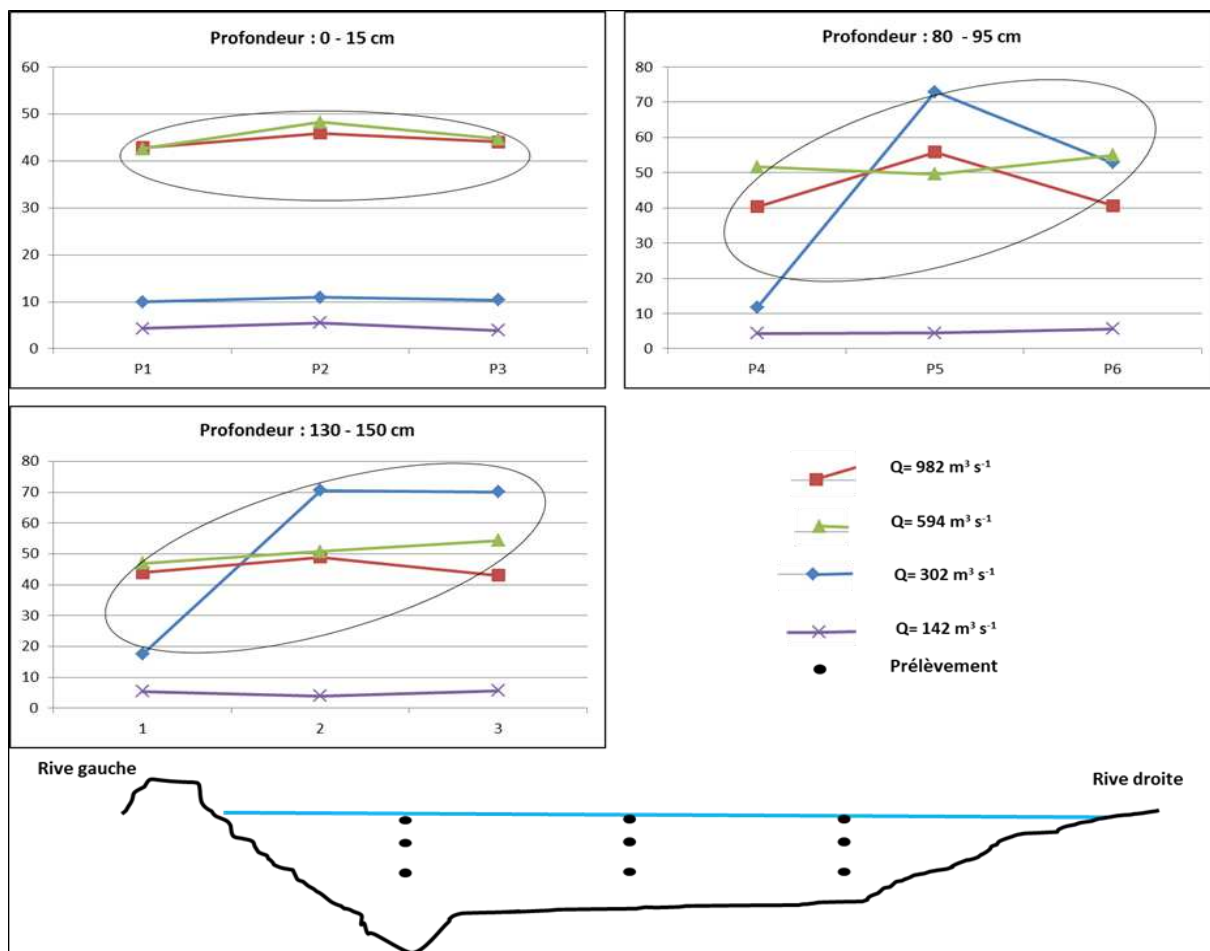


Figure 166. Variation transversale des concentrations de M.E.S en fonctions des débits (Q) et de la Profondeur, site de La Charité sur Loire.

Conclusion

Les résultats des différentes analyses effectuées dans nos trois sites ateliers mettent en évidence la complexité du fonctionnement de l'hydrosystème : **un cours d'eau influencé à différent degré par un forçage anthropique et évoluant dans un contexte de déficit sédimentaire et de calme hydrologique.**

On constate d'après les résultats de l'analyse topographique du chenal principal, une poursuite de l'incision du plancher alluvial (plus de 15 années après l'arrêt des extractions du granulat). L'érosion du fond du lit s'est produite à des rythmes différents dans les secteurs d'étude. Cela laisse penser à l'influence des aménagements conçus dans le lit mineur (degré d'aménagement de l'espace fluvial) et des nombreuses extractions de matériaux granulaires dans le lit mineur.

L'incision du plancher alluvial a entraîné des changements de la ligne d'eau. Cela engendre une modification des débits de connexion des annexes d'écoulements (augmentation des seuils de connexion des bras secondaires) et influence l'évolution spatiale du stock sédimentaire.

De leurs côtés, les différents aménagements fluviaux (digue, radier, chevrette et seuil rocheux artificiels) contraignent la dynamique fluviale et modifié les conditions de transport des flux d'eau et de sédiments. Ces ouvrages opérationnels, au temps de la navigation ligérienne, sont aujourd'hui obsolètes mais perturbent toujours la dynamique fluviale : impacts sur la rétention sédimentaire, influence des conditions d'écoulements, végétalisation du lit entre levées. Ces objets fluviaux ont ainsi contribué au réajustement fluvial toujours en cours (tendance à la rétraction de la bande active). **Les seuils durs créent une rupture de pente et entraînent une modification des caractéristiques physiques du flux liquide (vitesse et orientation) et par conséquent de la capacité de transport solide et les modalités de stockage de sédiment.**

D'un point de vue hydrologique, on constate l'effet de la variabilité interannuelle des conditions hydrologique sur les modalités du transport solide et la morphologie du cours d'eau. La fréquence et la durée de submersion sont les moteurs de régénération des formes fluviales. Les débits variant entre $800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (proche du plein bord) et $1600 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ semblent

avoir un effet morphogène durable (en raison de leur fréquence) et dans la majorité des cas en faveur de l'incision du lit.

Par ailleurs, les résultats des analyses topographiques et bathymétriques soulignent l'impact de la crue de novembre 2008 sur l'évolution du bilan sédimentaire. Cet événement hydrologique représente la crue la plus importante enregistrée durant la période d'observation. La réponse géomorphologique constatée dans nos trois secteurs d'études est différente. On enregistre un rehaussement du plancher alluvial dans le secteur de la Charité, une accentuation de l'incision du lit à Mesves. Sur le site atelier de Guilly, on enregistre une sédimentation au niveau de la première boucle et une érosion au niveau de la seconde, cette crue a accentué la discontinuité sédimentaire longitudinale (augmentation du stock sédimentaire en amont du site et accélération du rythme d'incision en aval). Les sites aménagés (La Charité et Guilly) ont évolué de façon différente par rapport au secteur dépourvu d'aménagements fluviaux (site de Mesves).

l'hypothèse
Au regard des résultats des mesures de M.E.S réalisées dans le site de La Charité-sur-Loire, on remarque que les concentrations de la charge solide transportée en suspension sont de l'ordre de 50 à 60 mg/l pour des débits variant de $300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à $1000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et le pic de concentration est atteint pour un débit avoisinant le module ($350 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Pour la crue de novembre 2008 ($2260 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), on note une valeur égale à environ : la valeur relevée pour la crue de décembre 2003 ($3\,350 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), 5 fois la valeur enregistrée pour la crue de février 2003 dont le débit est proche de celui de la crue de novembre 2008 ($2090 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) et environ 20 fois la valeur enregistrée pour un débit équivalent au module ($350 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).
L'augmentation des valeurs du débit n'engendre pas forcément une augmentation des concentrations de M.E.S.

Cette analyse ne nous permet pas de définir un débit « seuil » à partir duquel la concentration de M.E.S augmente de façon considérable. Cependant elle mérite d'être approfondie par d'autres études basées sur des prélèvements journaliers ou hebdomadaires pour établir une relation « débit liquide – M.E.S » plus détaillée. Cela afin de mieux comprendre les modalités de transport solide en suspension au sein de la Loire.

En fin, les travaux de restauration réalisés dans le lit mineurs et visant essentiellement la suppression de la végétation arbustive semble être efficace (dans les trois site ateliers). Cependant leurs fréquences irrégulières favorisent le développement de la végétation et réduit leur efficacité à long terme. Il est donc nécessaire de précéder ces interventions par des études visant la compréhension des modalités de l'évolution de la bande active, du couvert végétal et des conditions hydrologiques. Cela afin de comprendre le fonctionnement de ces systèmes fluviaux et d'optimiser les interventions de restaurations.

Les travaux de restauration sont nécessaires pour maintenir les bras secondaire ouvert (actifs) mais ils n'ont pas encore d'influence sur l'évolution verticale du chenal principal (au regard des conditions hydrologiques actuelles).

Deuxième Partie

Chapitre 6. Des modèles d'évolution à la gestion des cours d'eau, réflexions et discussions

Ce chapitre est composé de trois volets : le premier concerne la discussion et l'analyse des principaux résultats, cela permet de confronter les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de recherche avec des résultats de travaux réalisés à l'échelle internationale. Le second volet consiste à une mise des modèles conceptuels d'évolution des systèmes fluviaux à la dynamique fluviale de la Loire afin de mettre en évidence la particularité du fonctionnement de l'hydrosystème ligérien. En fin le troisième volet consacré à la mise en œuvre d'un protocole d'analyse pour optimiser les travaux de restauration, l'objectif est de fournir un outil d'aide à la décision.

Réflexion sur la gestion des espaces fluviaux

Discussion des principaux résultats

1.1 La rétraction de la bande active des lit fluviaux, *un phénomène répondu à l'échelle de la France*

Comme le phénomène de l'incision des lits fluviaux, la rétraction de la bande active caractérise un bon nombre de cours d'eau en France. Les rivières de piémonts évoluent dans un contexte de rétraction de la bande active : L'Ain, l'Allier, L'Ardèche, L'Eygues, La Loire, L'Ouvès, La Drôme... (Liébault et Piégay, 2002 *in* Corvol 2011 ; Dufour 2005 ; Landon et Piégay 1994). D'après Liébault et Piégay, (2002), le reboisement spontané des marges des cours d'eau français après 1945, du fait des mutations des pratiques pastorales dans le lit majeur, est également interprété comme un facteur de la rétraction des lits fluviaux. Cette dynamique augmentant les conditions de rugosité sur les marges du lit actif et favorise le développement de la végétation. La fréquence de submersion et de mise en mouvement des sédiments sur les marges de la bande active est un facteur limitant le développement de la végétation. On peut citer à ce titre l'exemple de la connexion amont du site de La Charité (bras A) où on constate l'absence de la végétation en raison du remaniement permanent du stock sédimentaire (chapitre 5).

Certain auteurs mettent en relation le phénomène de rétraction de la bande active avec l'état du bassin versant. Les cours d'eau à charge grossière et drainant un bassin versant boisé se caractérise par une réduction de la bande active (Piégay et Salvador, 1997 ; Surian et Rinaldi 2003). On constate de ce fait que l'extension du couvert végétal au sein des cours d'eau et la rétraction de la bande active peuvent être reliés à des processus opérants au-delà des limites spatiales du lit de la rivière (à l'échelle du bassin versant). Cela rend la gestion des cours d'eau plus complexe.

L'influence de la végétation riveraine

La végétation riveraine exerce une influence sur la géométrie du lit (Piégay et al, 2003), elle modifie de façon significative la morphologie de la rivière et la dynamique des flux solide et liquide (Gran et Christopher, 2001). La rétraction de la bande active peut être :

une réponse à l'expansion de la végétation au sein du lit (Schumm et Lichty, 1963 ; Williams et Wolman, 1984 ; Hupp, 1992), le changement climatique (Schumm, 1969 ; Gottesfeld et Johnson Gottesfeld, 1990), la construction de barrages en amont (Williams, 1978 ; Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf, 1997 ; Eustis 2006), des changements dans la gestion des terres (Nadler et Schumm, 1981), une introduction d'espèces exotiques de plantes riveraines (Hadley, 1961 ; Nevins, 1969 ; Turner, 1974 ; Graf, 1978) ou dans le cadre d'une cyclique, processus autogène (Patton et Schumm, 1981; Nanson, 1986). On note par ailleurs que l'interaction de la couverture végétale avec la largeur du lit est sujette à controverses. En prenant en compte le type de végétation occupant les marges des cours d'eau, certain auteurs comme Zimmermann et al, (1967) ; Bergeron et Roy (1985), montrent que les lits boisés se caractérisent par une largeur plus importante que les corridors fluviaux occupés par une végétation herbacée, alors que d'autre auteurs comme Hey et Thome (1986) ; Huang et Nanson (1997) montrent le contraire. Gregory et Gurnell (1988) expliquent cette divergence par l'influence des caractéristiques physiques des berges : une berge haute est plus résistante à l'érosion quand elle est colonisée par une végétation boisée (en raison de la taille des racines), or si la berge est basse le tissu racinaire herbacé agit plus efficacement que celui des arbres. (in Piégay et al 2003).

Les résultats des études réalisé par Piégay et al (2003) sur des rivières du bassin de la Loire (sur des ensemble régionaux homogène : hydro-éco-régions) mettent en évidence des résultats encore différents. Ces auteurs prennent en compte en plus de la hauteur des berges, le type de végétation installée dans le lit et les caractéristique granulométriques des berges. Les résultats obtenus indiquent que les systèmes racinaires ne vont contribuer significativement à la résistance des berges que lorsque celles-ci sont constituées de matériaux peu cohésifs, ce n'est que lorsque la berge est constituée d'un matériau peu cohésif, susceptible d'être érodé par les écoulements de crues courantes que la végétation peut renforcer sa résistance et la préserver de l'érosion. Sur le Rhône, Liébault et Piégay (2002), notent que l'arrêt des pratiques pastorales en milieu riverain a favorisé le développement de peupliers sur les bancs de galets. La fixation de ces bancs provoque ainsi la rétraction du lit mineur. **De ce fait, on peut penser que la résistance à l'érosion des bancs**

de sable déposés dans les bras secondaires de la Loire augmente en la présence du couvert végétal (peupliers et saules) et que la suppression de la végétation associée à des conditions hydrologiques proche du débit de pleins bords favorise la remobilisation des sédiments. La remobilisation de la charge sédimentaire suite à des débits proche des pleins bords a bien été constatée sur nos sites d'étude.

L'étude réalisée par **Jonathan et al (1996)** sur la rivière Plum Creek (Colorado) montre que le rétrécissement du chenal le long de ce cours d'eau est le résultat à la fois des fluctuations du niveau topographique du lit et du développement de la végétation : le couvert végétal s'est installé sur des surfaces « préexistantes » qui ont été formées par d'autres processus. L'extension de ce couvert végétal se fait par la suite au détriment de la bande active. Cette dynamique peut être rapprochée de l'évolution de l'hydrosystème ligérien. L'incision du plancher alluvial (aggravée par l'exploitation massive du granulat) à favoriser l'émergence des bancs et la mise hors eau de certains bras secondaires (réduction de la durée de submersion). Les résultats du chapitre 4 montrent par ailleurs l'influence des aménagements fluviaux (chevrette et seuils durs artificiels) sur la formation d'accumulation sédimentaire susceptible d'être fixée par la végétation. De telles conditions favorisent le développement et l'extension du couvert. Une fois installée, la végétation ralentit les écoulements et favorise la sédimentation et l'exhaussement progressif des bancs et des bras secondaires. La rétraction de la bande active est à mettre en relation avec l'expansion spatiale de la végétation et le degré d'aménagement de l'espace fluvial (digue, chevrette, quai...).

Impact des extractions du granulat les l'hydrosystèmes fluviaux

On note d'après les résultats des chapitres 3 et 5, l'influence des extractions massives du granulat sur le rythme d'incision du plancher alluvial à l'échelle de la Loire moyenne et aussi la poursuite de cette incision (à un rythme moindre) après l'arrêt des extractions de sédiments dans le lit mineur. Ces résultats amènent à supposer que le lit de la Loire est dans une phase de lissage du profil en long (par érosion progressive). Le contexte morphosédimentaire actuel de la Loire est toujours en faveur de l'ensablement des bras secondaires, l'incision du chenal principal et l'expansion des surfaces végétalisées.

L'exploitation de granulats dans les lits fluviaux a engendré dans de nombreux cas l'aggravation du phénomène d'abaissement du plancher alluvial et des perturbations du fonctionnement de l'hydrosystème : Le Doubs, l'incision du plancher alluvial (abaissement de 50 cm de la Ligne d'eau) a engendré une réduction des superficies en eau des zones humide péri-fluviales de la basse vallée du Doubs en raison de l'abaissement de la nappe d'accompagnement (**Rollet et al., 2006**), La Durance (**Miramont et Guilbert, 1997**), Russian River en Californie (incision de 3 à 6 m du lit entre levée, pas de possibilité de migration latérale pour compenser la déficit sédimentaire), la rivière San Luis Rey à San Diégo (l'incision menace les canalisations de gaz et autres équipements publics enfouis dans le lit), la rivière Kaoping, Taïwan (l'enfoncement du lit menace la stabilité des ouvrage d'art)(**Kondolf, 1997**), la Drôme et l'Ardèche, l'incision atteint en moyenne des valeurs respectives de 1,68 m et 0,43 m entre les années 1920 et 1994 (**Landon et Piegay, 1994**). En Italie, l'incision du lit du Secchia et du Santerno a atteint des valeurs records, soit 3 à 4 mètres dès le début des années 1960, fréquemment de 6 à 8 mètres à la fin des années 1970 avec des records à 12 mètres sur le Secchia ou 13 mètres sur le Santerno. Les préjudices engendrés par cet enfoncement se sont fait sentir sur l'environnement fluvial : aggravation des inondations dans les plaines aval, dégâts aux ouvrages d'art, épuisement des nappes phréatiques préjudiciable à l'alimentation des villes et au potentiel en eau d'irrigation et un recul de la côte adriatique (**Tagliavini, 1978 ; Pellegrini et al., 1979 in Bravard, 1994**). En Allemagne, l'incision du lit de la basse Salzach (liée aux rectifications de tracé, à l'extraction du granulat et à la construction de barrages à l'amont) a causé l'abaissement de la nappe phréatique et l'assèchement de la plaine alluviale (**Foeckler, 1994**).

L'influence de l'enfoncement du plancher alluvial sur la géométrie du lit n'a pas été toujours la même. Le déficit sédimentaire induit par les extractions de sédiments peut favoriser les processus d'érosion des berges et par conséquent l'élargissement du lit ou bien la rétraction de la bande active à travers le développement du couvert végétal au sein du lit surtout dans les cours d'eau endigués où la possibilité de migration latéral du chenal est réduite.

L'effet morphogène des évènements hydrologiques

Le croisement des résultats de l'analyse topographique et l'analyse interannuelle des conditions hydrologiques montre clairement l'influence des crues et des débits dominants (proche du débit à pleins bords) sur les processus d'évolution morphosédimentaire de la bande active : **la crue de novembre 2008 (crue de récurrence quinquennale) a engendré une augmentation des valeurs du budget sédimentaire que ce soit en faveur de l'érosion ou de la sédimentation. La réponse géomorphologique de nos sites atelier suite à cette crue est différente, on note une tendance à la sédimentation dans les secteurs pourvus de seuils durs artificiels (chevrette, enrochement). L'influence de cette crue est temporaire, ce sont les débits dominants (plus fréquents) qui contrôlent le plus les processus d'ajustement du lit (voir chapitre 5).**

La prépondérance des crues dans le bilan sédimentaire global a été démontrée dans de nombreuses études. Sur le Rhône, **Antonelli (1999)** montre que 80% de la charge en suspension transite lors des crues. L'étude réalisée par **Lallias-Tacon et al (2012)** sur Le Bès met en évidence des changements morphologiques significatifs pendant la crue de décembre 2009. Des processus morphologiques sont clairement observables comme des érosions de berge, des dépôts, et des migrations de chenal principal. Les résultats de l'analyse de l'évolution verticale du plancher alluvial réalisée par **Arnaud-Fassetta (1997)**, sur le Petit Rhône sont très proches des résultats que nous avons obtenus sur le site atelier de la Charité-sur-Loire (même réponse géomorphologique du plancher alluvial). Cet auteur montre clairement l'impact des crues sur les modalités d'évolution morphosédimentaire du fond du lit et met en évidence l'impact morphogène des débits de hautes eaux. Il note : *La phase d'accumulation dominante (1993-1994) est corrélée à la crue exceptionnelle d'octobre 1993 qui réinjecte dans l'hydro- système une charge sédimentaire importante. Les phases d'incision (1990-1993 et 1994-1995) sont liées à des processus plus complexes, sachant que des périodes de hautes eaux ordinaires sont morphogéniques.* Le passage de la crue a engendré un rehaussement temporaire du plancher alluvial du Petit Rhône. Ce dernier retrouve son état primitif (déficit sédimentaire) Vingt-neuf mois après que les crues d'octobre 1993 et de janvier 1994 aient

modifié pour « un temps » son bilan sédimentaire de façon positive. Ce laps de temps (passage d'un état de déficit sédimentaire à un état d'excédent de charge) est qualifié de période de récupération (Wolman et Gerson, 1978 in Arnaud-Fassetta, 1997). Le site atelier de La Charité a connus le même mode d'évolution avec un rehaussement du fond du lit après le passage de la crue de novembre 2008 et une reprise de l'incision en 2010 et 2011. *La relative instabilité des milieux de sédimentation apparaît comme un signe de l'inadaptation des paramètres morphologiques et des flux entrant dans l'hydrosystème fluvial* (Poinsart, 1992 in Arnaud-Fassetta, 1997).

Sur le secteur de Bréhement en Loire moyenne, Rodrigues et al (2005) montrent le rôle des crues (modérées ou importantes) dans l'accentuation de la morphologie asymétrique des chenaux. Ces événements hydrologiques favorisant l'exhaussement et le rattachement des zones végétalisées aux îles déjà présentes et l'érosion au sein des zones basses et nues. La répartition spatiale du stock sédimentaire est influencée par la topographie des chenaux et la présence de la végétation. Le rapprochement de ces résultats avec ceux du site atelier de Mesves fait ressortir quelques points de différence. Nous avons constaté après le passage de la crue de novembre 2008 une sédimentation au niveau de connexion aval du bras secondaire de Mesves, ce secteur est relativement bas est dépourvu de végétation. Cela laisse penser qu'en période de crue la topographie des chenaux peut être modifiée et dans certain cas des zones basses peuvent faire l'objet d'accumulation. Ces dépôts sédimentaires sont susceptibles de disparaître suite à des événements hydrologiques de plus faible intensité (crues modérés ou haute eau).

Les variations verticales du plancher alluvial et des bras secondaire sont influencés par : la chronologie, le rythme et l'intensité des événements hydrologiques, la variabilité spatio-temporelle de la charge solide au sein du lit et la présence d'aménagements fluviaux. L'incision du lit ne s'effectue pas forcément lors des plus fortes crues; des périodes de hautes eaux ordinaires peuvent avoir des effets morphogéniques sur le fond sableux du cours d'eau (Arnaud-Fassetta, 1997).

Il existe selon Copeland et al (2000), trois méthodes pour définir les débits dominants « Channel-Forming Discharge » : la première définit ce débit comme le débit maximal que

le chenal peut évacuer sans couler sur sa plaine d'inondation, la seconde méthode considère comme débits dominant le débit le entre le pic et la moyenne annuelle sur cinq années, la troisième méthode consiste à définir le débit permettant de transporter la fraction la plus importante de la moyenne annuelle de la charge solide du chenal. Le choix de la méthode dépend de la disponibilité des données, les caractéristiques physiques du site, le niveau d'étude et le temps et les contraintes financières. Il est préférable, si possible, d'utiliser les trois méthodes afin de réduire l'incertitude dans l'estimation finale. Le débit dominant est souvent rapproché du débit à pleins bords. Ce débit est considérée comme morphogène, car il représente le point rupture entre les processus de formation du chenal et de la plaine d'inondation. La détermination du débit à pleins bords varie selon les auteurs. Les indicateurs communément utilisés pour définir le débit à pleins bords sont la hauteur de la plaine d'inondation (active) (**Wolman et Leopold, 1957 ; Nixon 1959**) ou la valeur minimum du rapport « largeur/profondeur » (**Wolman 1955; Pickup and Warner 1976 ; Knighton 1984**). **Leopold et Wolman (1957)**, utilisent comme indicateur pour déterminer le débit à pleins bords (dans certains cas) le point culminant des dépôts sédimentaire au sein du lit. **Schumm (1960)** définit comme indicateur la hauteur de la limite inférieure de la végétation pérennes, principalement des arbres.

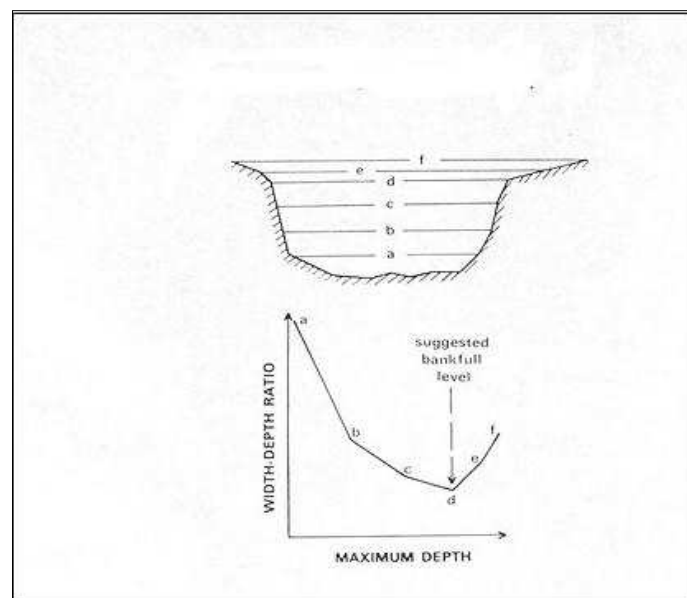


Figure 167. Détermination du débit à pleins bords en utilisant le rapport « largeur/profondeur » d'après Knighton (1984).

La largeur de la bande active est influencé par : les caractéristique granulométrique du lit, l'évolution topographique du plancher alluvial, le type de végétation dans le lit, l'occupation du sol à l'échelle du bassin versant, la position altimétrique de la nappe phréatique et les conditions hydrologiques. Au regard des conditions hydrologiques actuelles (affaiblissement de l'intensité et la fréquence des crues) et à la tendance d'enfoncement du lit, le contexte de déficit sédimentaire dans lequel évolue la Loire favorise d'avantage l'envahissement du lit par la végétation au détriment de la bande active.

Contexte scientifique, apports de l'approche fondamentale

Le rappel des concepts fondamentaux peut servir d'éclaircissement épistémologique préalable et indispensable à toute étude géomorphologique (**Blanchon et Bravard 2007**). Ces concepts montrent clairement les relations (processus-réponse) entre les processus géomorphologique, écologique et hydrologique (figure 1). L'objectif de la présente analyse est de mettre en évidence l'application des concepts fondamentaux dans notre travail de recherche. Ces derniers sont présentés de façon hiérarchique selon leurs échelles spatiale d'application et leurs implications dans la problématique étudiée dans le cadre de la présente thèse.

Rappel historique : du concept écosystémique au concept hydrosystémique

Au début des années 1900, la plupart des études des cours d'eau ont été guidées par des concepts empruntés à la biologie (**Barry *et al.*, 1995**). Ces études se focalisaient sur la description de l'histoire de la vie dans le fleuve et le mode de distribution des organismes vivants (**Minshall, 1988 ; Minshall *et al.*, 1985**). Les études réalisées dans le milieu des années 1900, portaient sur la description et la mesure de la production biologique et le flux d'énergie dans les cours d'eau. En outre, les travaux sur l'hydrodynamique et la géomorphologie pendant la même période suggèrent que les caractéristiques physiques d'un cours d'eau étaient liées au rapport « géométrie-hydraulique », c'est-à-dire une forte corrélation entre le débit entrant dans un cours d'eau et les caractéristiques géométriques de celui-ci en un point donné (**Leopold et Maddock, 1953 ; Leopold *et al.*, 1964**). Autrement dit c'est la mise en relation entre le débit liquide et le débit solide. La répartition spatiale du stock sédimentaire dépend en grande partie des conditions hydrologiques

Dans les années 1960, une approche expérimentale s'est développée afin d'étudier les relations entre les facteurs environnementaux et biotiques au sein des cours d'eau. Plus récemment, les concepts physiques et biologiques ont été combinées en une approche plus holistique qui considère les systèmes lotiques comme des combinaisons d'interdépendance des paysages terrestres et aquatiques (**Barry *et al.*, 1985**).

2.1 L'intégration des concepts fondamentaux dans notre travail de recherche

Les processus géomorphologiques sont à l'origine de la formation des structures qui fournissent le cadre physique de l'habitat nécessaire pour assurer une diversité faunistique dans les milieux rivulaire. La géomorphologie fluviale est considérée comme l'un des éléments clés pour la compréhension du fonctionnement des l'hydrosystèmes fluviaux (Shumm, 1977). De ce fait, ces concepts représentent les fondements scientifiques de notre travail de recherche. La notion de *Continuum Fluvial* trouve un champ d'application dans l'analyse de l'évolution du plancher alluvial que nous réalisons à l'échelle de la Loire moyenne. Cette approche est fondée sur l'analyse du rôle morphogène du transit des flux solides et liquides le long d'un axe amont-aval. Ainsi nous mettrons en évidence dans notre analyse l'impact de l'action anthropique sur la dynamique fluviale (présence de barrages, seuils, chevrettes, digues et extractions de granulats) mais aussi l'influence des zones d'alimentation (les hauts bassins). On intègre également dans l'interprétation des impacts anthropiques les principes développés dans le modèle théorique de perturbations mis en place par Stanford et Ward (1983, 1995) « *Serial Discontinuity Concept* ». Ces auteurs intègrent les dimensions spatiales (latérale, verticale et longitudinale) et considèrent le type de chenal (rectiligne, en tresse, à méandre), comme élément important pouvant apporter des modifications aux notions de perturbation et de résilience. Nous partons du même principe pour analyser la réponse géomorphologique du cours d'eau suite à l'édification des différents ouvrages (seuils artificiels, des digues, chevrettes). Ces petits aménagements sont nombreux sur le cours de la Loire et leur impact sur la dynamique morphosédimentaire reste peu connu.

Les principes théoriques développés dans le *Flood Pulse Concept* sont d'une grande importance dans notre travail de recherche, l'analyse des durées de submersion des bras secondaires permet de déterminer l'impact de la variation du niveau de l'eau sur le développement de la végétation et aussi sur l'évolution morphosédimentaire au sein de la bande active. Les conditions de mise en eau des bras secondaires déterminent les modalités du transport solide aux seins de ces annexes d'écoulement. Les « pulsations » du flux liquide peuvent avoir un effet considérable sur l'efficacité des travaux de restauration

réalisés dans le lit mineur. Les crues font également l'objet d'une étude d'impact sur l'évolution du stock sédimentaire dans le lit mineur.

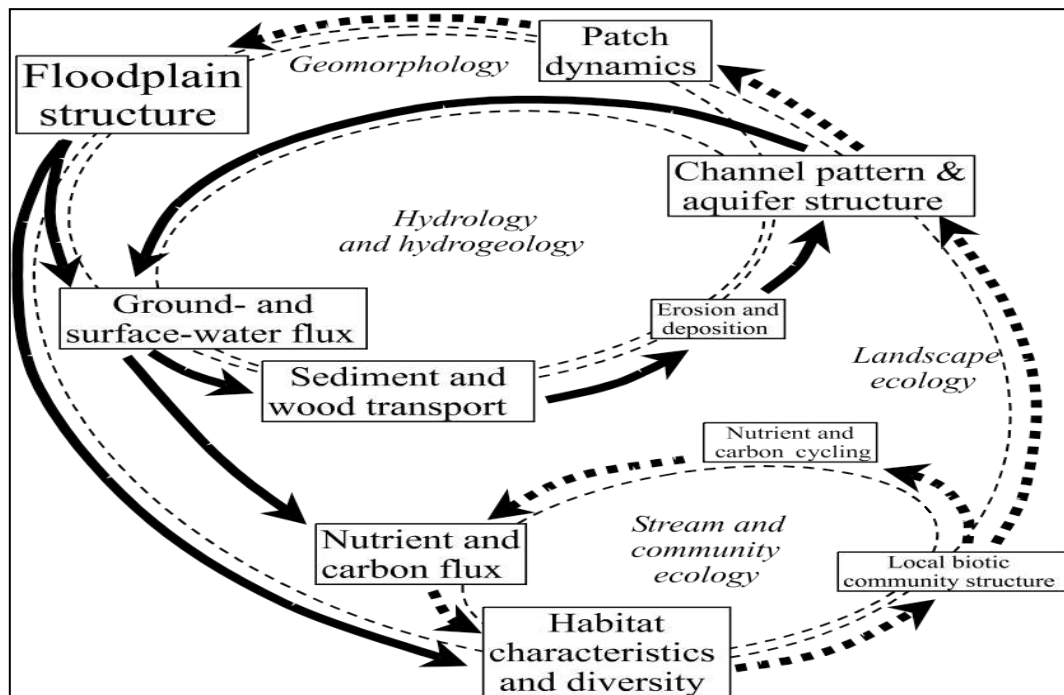


Figure 168. Modèle conceptuel illustrant la complexité de la dynamique fluviale.

La taille du texte représente l'échelle spatio-temporelle : le texte de grande taille représente l'échelle spatio-temporelle longue et le texte de petite taille représente l'échelle spatio-temporelle courte. Les flèches pleines représentent les processus physiques et des flèches en pointillés représentent les interactions biogéochimiques. On remarque que les processus géomorphologiques : transport solide, géométrie du lit et dynamique hydromorphologique sont au cœur des interactions entre les composantes de l'hydrosystème. (Poole, 2002).

Le concept d'hydrosystème

La notion et le terme d'hydrosystème appliqués au bassin versant ont commencé à être utilisés dans les années 1960 par les morphologues et les hydrologues anglo-saxons, en 1962 **Chorley** évoque le système fluvial « stream system » dans son article intitulé : « Geomorphology and general systems theory » (**Chorley, 1962 ; Chow, 1965**). L'approche systémique s'est généralisée dans les années 1970 et le terme s'est imposé à la fin des années 1980 (**Dacharry et al., 1996**).

Selon le Glossaire SDAGE (Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 1995) l'hydrosystème est définie comme un ensemble de composantes : une composante atmosphérique (vapeur d'eau, précipitations solides et liquides), une composante superficielle, le bassin versant et les milieux aquatiques superficiels (cours d'eau, plans d'eau, voies d'eau, zones humides, sédiments et matières en suspension incluses) et une composante souterraine (sols, sous-sol, aquifères, cours d'eau souterrains, réseaux souterrains...). Comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, le concept d'hydrosystème est considéré comme un système à processus-réponse. Il tient compte des éléments suivants (**Amoros et Petts, 1993**) :

- trois dimensions dans lesquelles s'effectuent des échanges entre les composantes de l'hydrosystème à l'échelle du bassin versant : longitudinale (flux le long du gradient amont-aval), transversale (échange cours d'eau-plaine alluviale) et verticale (liens verticaux entre les eaux superficielles et souterraines) ;
- une dimension temporelle appréhendée à différentes échelles emboîtées, du pas de temps court au temps géologiques : échelle brève et aléatoire (crue), échelle annuelle (hautes eaux et étiages), de 10 à 100 ans (morphodynamique fluviale), de 1000 à 10000 ans (processus géomorphologiques globaux) ;
- l'intégration des interférences humaines avec les processus naturels (l'impact des actions de gestion et d'aménagement sur le fonctionnement de l'hydrosystème) ;
- une organisation hiérarchique de la mosaïque écologique constituée de secteurs fonctionnels, qui regroupent des ensembles fonctionnels constitués à leurs tours d'une multitude d'unités fonctionnelles (voir figure).

Ce concept met en évidence la complexité du fonctionnement des systèmes fluviaux à une échelle plus grande que celles prises en compte par les concepts : « River Continuum » et « Flood Pulse ». Il met également l'accent sur la notion de processus-réponses et tient compte de la globalité et la spécificité d'un espace géographique en intégrant toutes les interférences, y compris les influences humaines (approche systémique). Les auteurs de ce concept, élaboré et testé sur le Rhône, indiquent qu'il est particulièrement adapté aux

grands cours d'eau, ou tout au moins à ceux disposant d'une plaine alluviale suffisamment vaste pour permettre la création de la mosaïque d'unités géomorphologiques et d'écosystèmes cités plus haut, notamment les sous-systèmes du lit majeur (Amoros et al., 1987 ; Dacharry et al., 1996 ; Malavoi et Bravard, 2010). Ce concept nous a permis d'acquérir des éléments d'analyse et de compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème et d'élargir le champ d'interprétation des processus hydrogéomorphologiques. Comme l'attestent les résultats de nos sites ateliers, l'ajustement contemporain du lit de la Loire est lié à des facteurs anthropiques et naturels agissant à l'échelle du bassin versant et affectant le fonctionnement morphosédimentaire du cours d'eau à différentes échelles spatiales (tronçon, secteur fonctionnel et micro habitats).

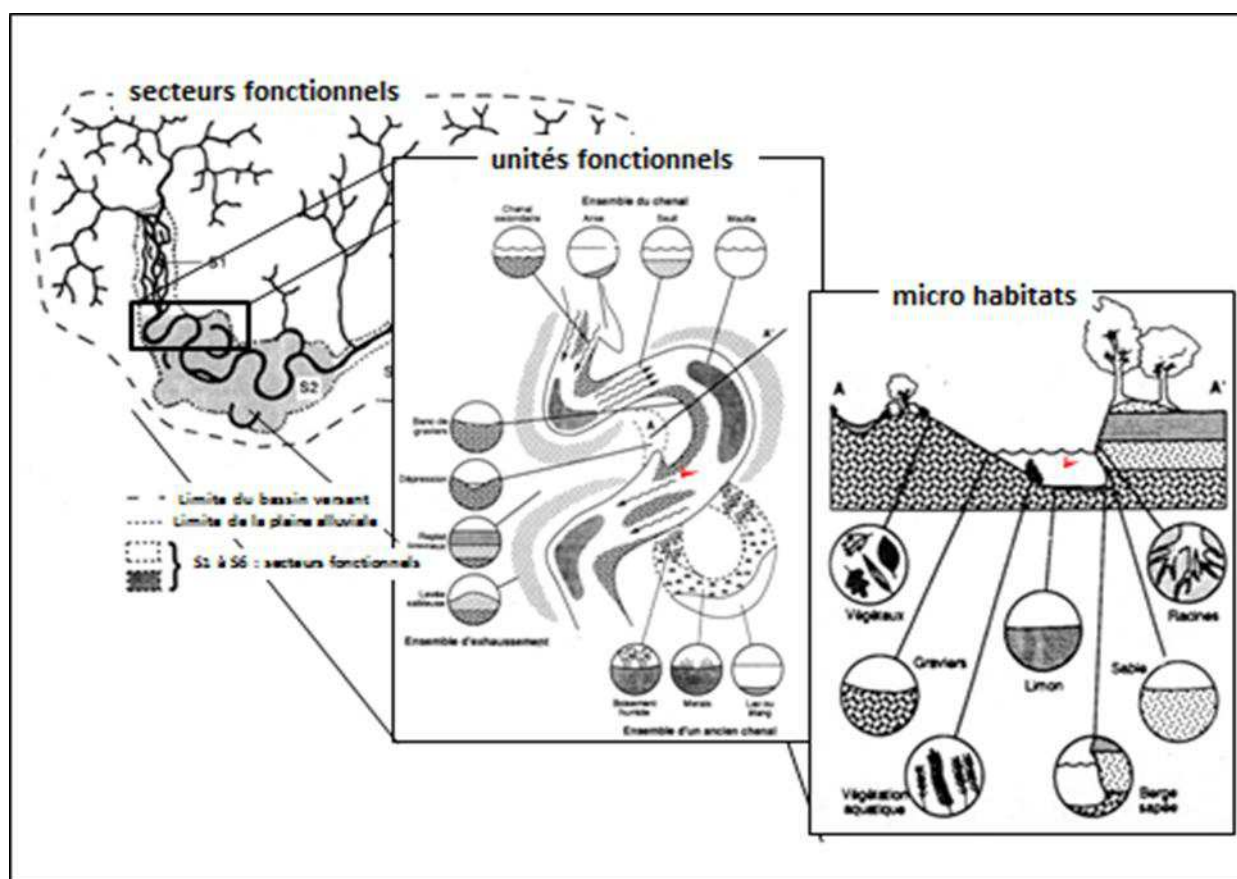


Figure 169. Répartition hiérarchique des composantes de l'hydrosystème fluvial. D'après Amoros et Petts, 1993.

Le Concept « *River-Continuum* »

Introduit dans les années 1980 par Robin L. Vannote, le concept de Continuum Fluvial (River Continuum Concept) est un modèle qui décrit selon un axe longitudinal (amont-

aval) le fonctionnement écologique des rivières dans les zones tempérées. Ce modèle intègre des indicateurs biologiques et des processus géomorphologiques, il repose sur l'idée que les cours d'eau, de leurs sources à l'estuaire sont considérés comme des écosystèmes ouverts, en interaction avec leurs ripisylves et le contexte éco-hydraulique qui en dépend. Les modifications progressives de leurs caractéristiques physiques (largeur, profondeur, débit, courant, température...) de l'amont à l'aval engendrent un gradient continu des ressources trophiques disponibles qui détermine la distribution des invertébrés. La variation de la largeur du lit influence les caractéristiques écologiques du cours d'eau (**Vannote *et al.*, 1980**), elle est aussi un indicateur de modification de l'évolution spatio-temporelle du stock sédimentaire. On constate d'après les résultats de l'analyse morphosédimentaire (chapitre 4 et 5) l'influence des conditions hydrologiques et du couvert végétal sur la répartition spatial du stock sédimentaire au sein du lit. Ce dernier représente dans plusieurs cas un abri pour la faune et un support physique pour la flore (berges, bras secondaires et bancs). Par ailleurs, le phénomène d'incision du plancher alluvial influence grandement l'évolution du cortège floristique à travers l'exhaussement (l'ensablement) des annexes d'écoulement et l'assèchement des zones humide et par conséquent la dégradation de l'habitat et de la biodiversité. Le continuum sédimentaire « amont-aval » est en étroite relation avec le continuum écologique. C'est dans ce contexte que le concept de « River-Continuum » trouve son application dans notre travail de recherche.

D'autres auteurs ont apportés des compléments à ce modèle global. Ces derniers intègrent dans le model l'influence des obstacles tels que grands barrages, seuils durs, chute d'eau et zones de forte pollution (**Statzner et Higler, 1985**), ou encore le rôle des affluents dans le fonctionnement du système (**Bruns *et al.*, 1984**). Ces éléments sont alors étudiés comme facteurs de fragmentation écologique de ce continuum (**Blanchon et Bravard 2007**). Ces mêmes ouvrages (barrages seuil durs) influencent l'évolution morphosédiments du lit. Les aménagements fluviaux exercent une influence considérable sur le transit sédimentaire et peuvent influencer la géométrie du lit en modifiant le rapport entre les débits solide et

le débit liquide. Ces modifications ont un impact sur la typologie et l'évolution spatial du couvert végétal le long du cours d'eau.

Quelques soient les critères pris en compte dans leurs conceptions, ces différents exemples de zonation longitudinale illustrent de manière claire les liens entre les paramètres physiques (pente, largeur du lit...) qui sont des variables de réponse à des modifications du rapport « débit solide/débit liquide » et les caractéristiques écologiques (répartition spatiale des habitats) au sein des systèmes fluviaux. La restauration des cours d'eau doit tenir compte des relations entre ces composantes à l'échelle de l'hydrosystème.

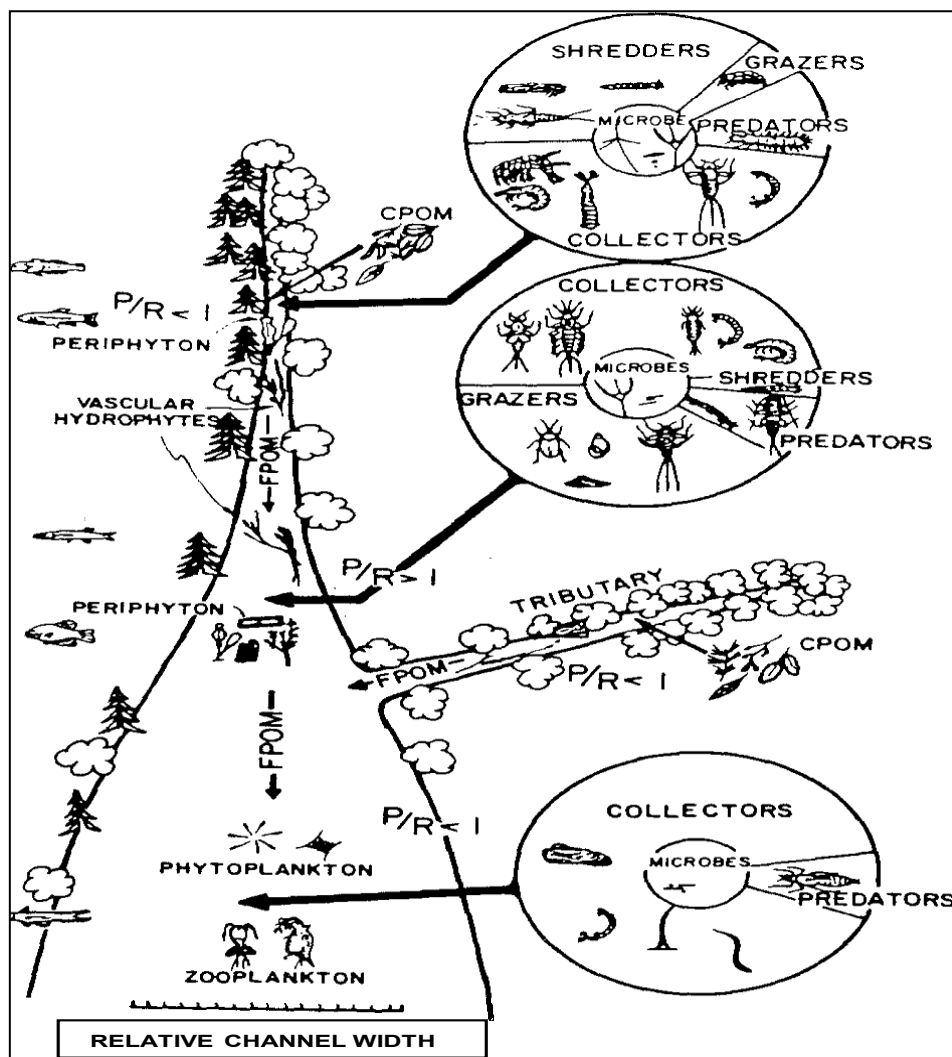


Figure 170. illustration du concept de continuum fluvial selon Vannote et al., 1980. *Progression graduelle (amont-aval) des attributs structuraux et fonctionnels des communautés logiques.*

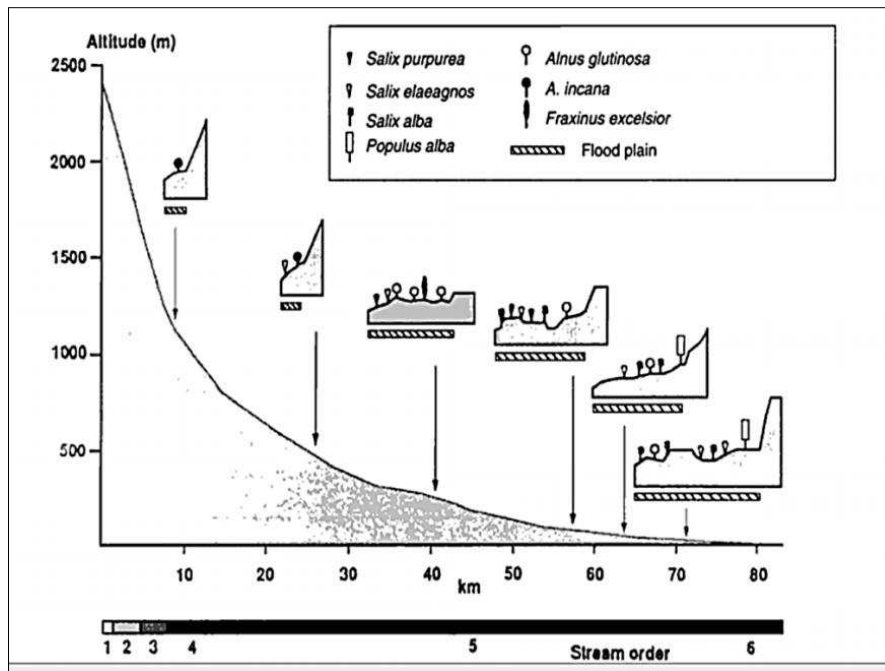


Figure 171. Variation selon un gradient longitudinal de la largeur et de la composition spécifique de la ripisylve depuis le tronçon amont du Tech jusqu'à son embouchure. D'après Pinay et *al.*, 1990 in Piégay et *al.*, 2003.

c. Le « *Flood Pulse Concept* »

Le Concept « Flood Pulse » a été élaboré pour décrire les variations saisonnières des niveaux d'eau sur les plaines d'Amazonie et leurs rapports à la dynamique fonctionnelle et le maintien de la diversité des espèces (Junk, 1982, 1997; Junk et Howard-Williams, 1984 ; Junk et al, 1989 ; Bayley, 1995). Il promulgue l'idée que les rivières et leurs plaines sont des composants intégrés d'un système dynamique unique, reliés par de fortes interactions entre les processus hydrologiques et écologiques. **La force motrice majeure est la pulsation du débit de la rivière.** Elle détermine le degré de connectivité et les processus d'échange de matière et d'organismes entre le cours d'eau et la plaine d'inondation (voir figure). Les échanges latéraux entre lit mineur et plaine d'inondation (la production, la décomposition) sont en grande partie assurés par les crues. Ces dernières sont produites par un ensemble de facteurs géomorphologiques et hydrologiques. Selon Junk et al (1989) la durée de la crue est un élément important dans la dynamique écologique des zones humides, les crues de longue durée favorisent l'adaptation des organismes vivants et l'exploitation des ressources de la zone de transition existant entre le milieu aquatique et le milieu terrestre (ATTZ : Aquatic/Terrestrial Transition Zone). Ces auteurs

évoquent aussi les transformations importantes dans le réseau hydrographique suite à l'endiguement et au drainage des plaines d'inondation. Ces actions anthropiques peuvent créer une déconnection entre le lit mineur et la plaine or le rendement et la production de poissons par exemple sont étroitement liés à l'étendue de la plaine inondable, tandis que le cours « normal » de la rivière est utilisé comme voie de migration par la plupart des poissons (**Junk et al., 1989**). L'altération des écosystèmes fluviaux est fréquente dans le monde (**Petts et al., 1992 ; Junk, 1999**). Cela est particulièrement vrai dans les régions tempérées, sur les 139 plus grands systèmes fluviaux en Europe, les républiques de l'ex-Union soviétique, et les régions au nord du Mexique, 77 % sont concernés par la construction de barrages et l'exploitation des ressources en eau (prélèvement, irrigation), (**Dynesius et Nilsson, 1994**). Les levées et les barrages modifient les caractéristiques géomorphologiques des systèmes fluviaux (rétention de sédiment, rétrécissement du lit majeur et modification des caractéristiques hydrologiques) et influencent les modalités du transit sédimentaire et le recyclage de la matière organique. Selon **Junk et al (1989)**, l'action de l'homme sur les crues et sur les plaines inondables limite souvent la production. Une plaine inondable peut cependant se former localement par sédimentation dans un tronçon de cours d'eau modifié par un barrage. Aussi, les rives des cours d'eau à faible débit se transforment en plaines inondables suite à la formation de levées alluviales qui les séparent du chenal principal (**Junk et al., 1989**). Le Concept « Flood Pulse » a stimulé une série d'études qui ont mis en évidence l'intérêt écologique des inondations dans un large éventail d'écosystèmes fluviaux (**Van den Brink et al, 1993 ; Bayley, 1995 ; Heiler et al, 1995 ; Prach et al, 1996 ; Knowlton et Jones, 1997; Lorenz et al., 1997; Michener and Haeuber, 1998 ; Spink et al., 1998 ; Ward et al., 1999b,c ; in Tockner et al., 1999b**). Les travaux de **Tockner et al (1999)**, apportent des éléments complémentaires à ce concept en considérant le rôle de la température comme déterminant dans le fonctionnement de l'écologie des plaines d'inondation et en élargissant les champs d'analyse sur d'autres systèmes fluviaux dont des régions tempérés (similaire au climat de la Loire).

Le « Flood Pulse Concept » a largement contribué à la compréhension des interactions entre cours d'eau et plaines d'inondations (**Tockner et al., 1999**). Il est de plus en plus

reconnu comme une étape essentielle dans la restauration des zones humides (Middleton, 2002). Ce concept diffère du Concept de Continuum Fluvial en deux points :

- la prise en compte de la dimension transversal dans l'analyse des processus écologiques, hydrologiques et sédimentaires au sein des systèmes fluviaux,
- le rôle important des inondations (crues) qui se manifestent par « à-coup » et qui ne sont pas des processus continus (écoulement épisodique, cette situation est différente de celles prises en compte par les concepts qui mettent l'accent sur les processus continus intervenant dans les eaux courantes, tel le Concept du Continuum appliqué aux cours d'eau) (Junk et al, 1989). On peut considérer de ce fait, les deux concepts comme complémentaires.

Ce concept met l'accent sur la pulsation du débit des cours d'eau. Il montre le rôle de la mise en eau des espaces fluviaux (lit et plaine d'inondation) dans la préservation de la biodiversité. Le régime hydrologique est l'un des paramètres de contrôle de la dynamique morphosédimentaire. L'affaiblissement de la dynamique hydrologique impact le stock sédimentaire en réduisant la capacité de transport solide. Cette charge solide est susceptible de se fixer par la végétation. Le « Flood Pulse Concept » fournit donc des éléments de compréhension et de gestion des cours d'eau. Les travaux de restauration réalisés dans le lit de la Loire (ouverture des bras secondaires par la suppression de la végétation) peuvent être optimisés par des études préalables intégrant les principes du « Flood Pulse Concept » : fréquence de submersions, force tractrices et capacité de transport. Ces indicateurs renseignent sur la dynamique hydrosédimentaire. Ils sont de ce fait nécessaires pour améliorer les travaux d'entretien et de restauration (dévégétalisation) réalisés dans le lit mineur. **L'efficacité de ces interventions est étroitement liée aux conditions hydrologiques et à la capacité de transport de la charge solide.**

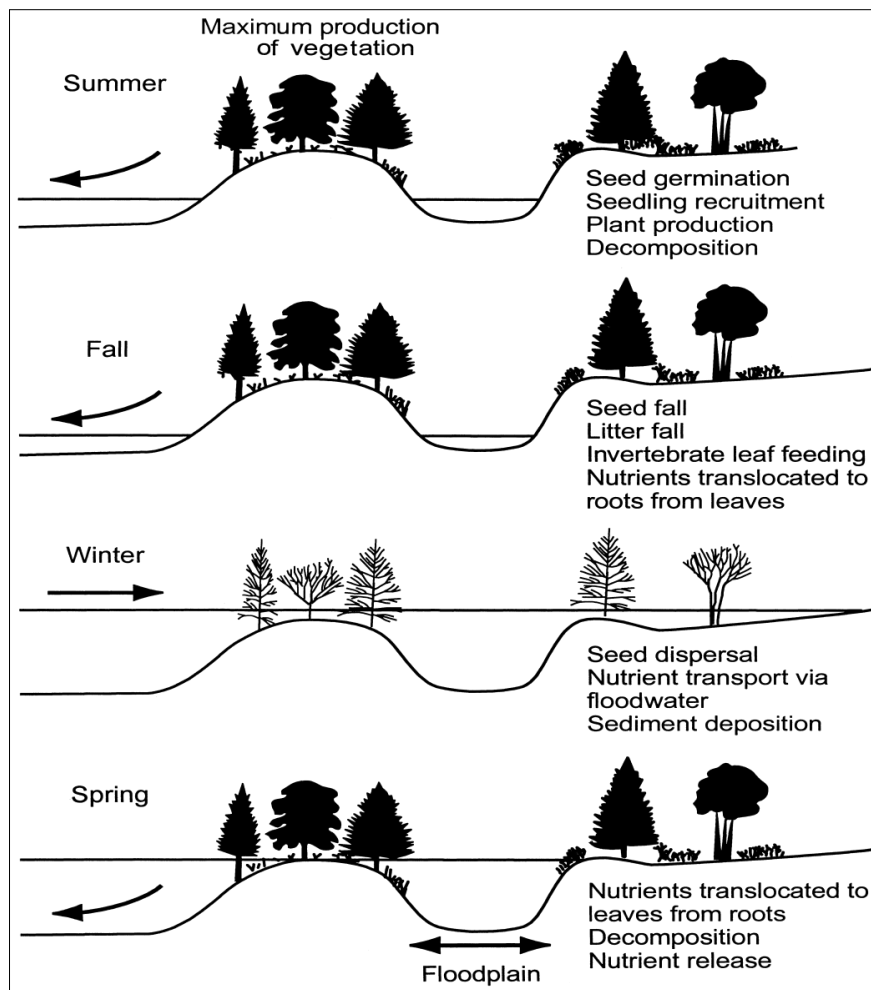


Figure 172. Evolution saisonnière du niveau d'eau dans une plaine boisée en Amérique du Nord.

Les échanges d'éléments nutritifs dépendent en partie des échanges latéraux d'eau et de sédiments. (Adapté de Bayley, 1991 in Middleton, 1999b).

d. La notion d'équilibre dynamique

La morphologie des rivières varie en fonction des fluctuations des débits liquide et de la charge solide à l'échelle du bassin versant. Ces variables dites externes ou de contrôles sont elles-mêmes sous l'influence du climat et de la couverture végétale (augmentant la résistance du sol à l'érosion), **Thorne (1997)**, rajoute des variables secondaires comme : la pente et la topographie de la vallée et la granulométrie du lit et des berges.

Les flux solide et liquide varient en fonction du temps et à l'échelle des différentes unités du bassin versant (plaine, cours d'eau, versant...). Les variables externes s'imposent directement à la rivière et contrôlent son évolution physique (**Malavoi et Bravard, 2010**).

Le cours d'eau adopte sa géométrie selon le rapport entre le débit liquide et la charge solide, il tend vers l'incision (érosion du plancher alluvial et des berges) si ce rapport est en faveur du débit liquide et vers la sédimentation si ce même rapport est en faveur de la charge solide. Dans des conditions naturelles relativement stables les rivières tendent à établir un « équilibre dynamique » entre ces deux variables de contrôles (**Schumm, 1977**). L'équilibre dynamique est un ajustement permanent autour d'une géométrie moyenne (respiration du lit). L'ajustement des formes de la rivière se fait à travers la modification des paramètres physiques connus sous le nom de variables de réponse : La largeur du lit, sa profondeur, la pente du chenal, le style fluvial, la taille des sédiments et la rugosité du lit. Ces différentes variables s'ajustent en fonction des modifications apportées à l'ensemble du système (**Hey, 1978**). Les variables de réponse sont des degrés de liberté dont dispose le cours d'eau afin d'assurer le transit du flux liquide et de la charge solide. **Bravard et Petit, (1993, page)** rajoutent : « Ainsi toute modification, même naturelle, de l'une des variables de réponse est en théorie susceptible d'entraîner, par un processus complexe d'interactions et de rétroactions, une mutation de tout ou partie du système ».

L'équilibre dynamique des rivières n'est pas permanent, des perturbations peuvent avoir lieu suite à des modifications d'origines naturelle (le climat et la géologie) ou anthropique (aménagement, gestion des surfaces du bassin versant) les cours d'eau s'adaptent de façon régulière à ces modifications.

Les travaux réalisés dans ce domaine mettent en lumière de nombreux états d'équilibres des systèmes fluviaux (**Butzer, 1982 ; Graf, 1985 ; Sear, 1996**). On distingue principalement les cas suivants (selon **Sear, 1996 in Malavoi et al., 1998**) :

1) des cours d'eau touchés par des modifications de faible ampleur (simples oscillations autour de valeurs moyennes), le style fluvial ne change pratiquement pas, le pas de temps varie de 50 à 100 ans.

2) Si le cours d'eau fait l'objet de changements durables, le style fluvial peut changer de manière durables aussi et n'évoluer ensuite que faiblement autour d'une nouvelle géométrie moyenne d'équilibre. Ces modifications de style fluvial peuvent avoir lieu suite

à des altérations durable des variables externes ou même internes (changements climatiques majeurs, aménagements durables du cours d'eau ou du bassin versant : créant un déséquilibre au sein de l'hydrosystème). Le pas de temps varie de 50 à 100 ans.

3) Les modifications apportées aux cours d'eau sont fortes mais relativement brèves, l'effet de ces altérations n'est pas permanent. En réponse à ce changement temporaire le cours d'eau s'oriente quelque temps vers un nouveau style puis revient progressivement à son style antérieur.

4) Ce cas concerne les ajustements sur le long terme, les modifications et les changements de styles peuvent être assez fréquents, en fonction des fluctuations de Q et Q_s ou de perturbations externes majeures (variation du niveau des mers, mouvements tectoniques, etc.).

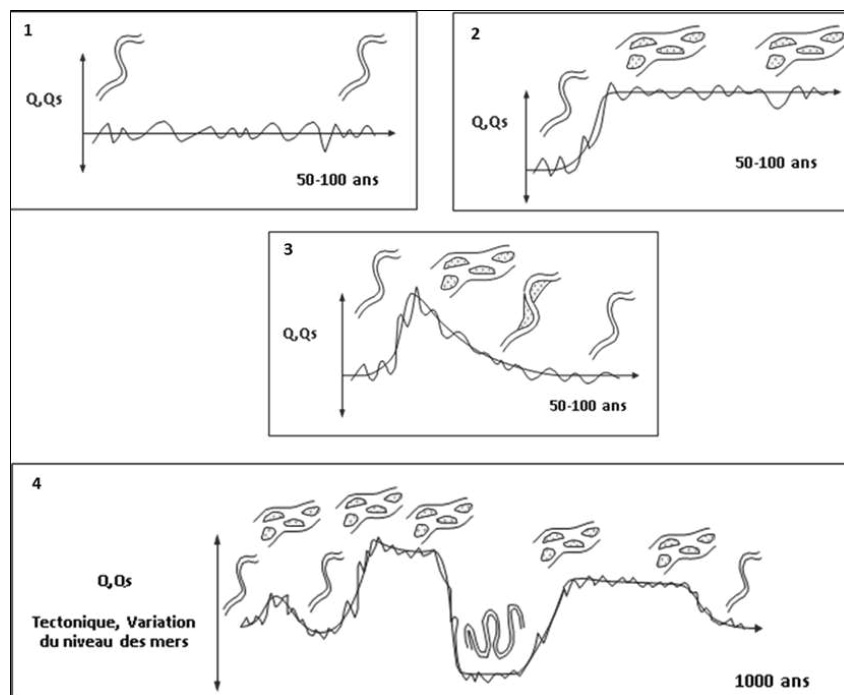


Figure 173. Différents cas d'évolution du style fluvial.

(1) sans changement de forme, (2) changement de forme, le pas de temps varie entre 50 et 100 ans, (3) changement de forme et un retour à la forme initiale, le pas de temps varie entre 50 et 100 ans, (4) changement du style fluviale sur un pas de temps de 1000 ans (retour au tracé initial), mise en relation avec la tectonique et la variation du niveau marin. (Source : Sear, 1996).

L'incision des lits fluviaux constatée en France est due dans la majorité des cas à un déficit sédimentaire (barrages, exploitation de granulats dans le lit mineur dans de nombreux fleuves : la Loire, l'Allier, la Garonne, le Fier, le Buëch, la Bléone, etc.). Dans le cas de la Loire moyenne et comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, la métamorphose du lit est due en grande partie aux modifications anthropiques. L'influence permanente des différents ouvrages fluviaux et les mutations socio-économiques (digues, barrages, chevette, reboisement des bassins amont, le déclin de la navigation) ont provoqué un déséquilibre de l'hydrosystème de façon durable. L'ajustement des formes du lit se fait dans des conditions caractérisées par un déficit sédimentaire. Cet exemple se rapproche de l'équilibre dynamique métastable décrit dans le cas numéro 2 (figure) : on passe en l'espace d'environ un siècle d'un chenal large à un système de chenaux multiples séparés par des îles boisées. La phase de transition entre ces deux styles fluviaux correspond le plus à la période de mutations socioéconomiques : l'arrêt de l'entretien du lit (declin de la navigation), abandon des activités agropastorales et l'exploitation du granulat dans le lit (figure 174).

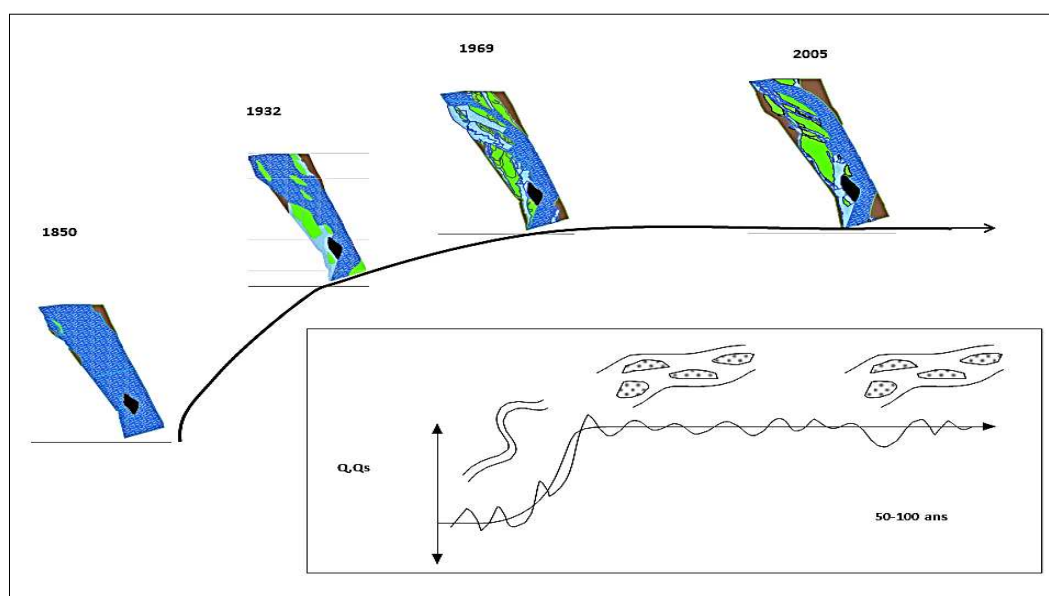


Figure 174. Rapprochement du modèle de réajustement proposé par Sear (1996), avec l'évolution des formes en plan du site ateliers de la Charité-sur-Loire.

Passage d'un chenal unique et large à un système de bras multiples (large) comme phase intermédiaire avant de passer à la phase de chenalisation (bras secondaire étroits). (Source : Sear, 1996 modifiée).

Par ailleurs, le modèle descriptif d'évolution proposé par **Graf** en 1979 semble adapté aussi aux cas de la métamorphose du lit de la Loire moyenne en intégrant une phase de transition dans le changement des formes fluviales. Ce modèle est connu sous le nom de : *théorie de la catastrophe* (les catastrophes sont des formes géométrique illustrant les changements dans l'espace et le temps). L'auteur met en évidence dans son modèle l'existence d'une phase de transition entre deux types d'équilibre (suite à la modification de variables de contrôles). Cette transition peut se faire de façon brutale ou graduelle (**Blonchon, 2009**). Il nous semble possible de rapprocher le passage graduel entre deux états d'équilibre proposé par **Graf** avec la phase de mutation des formes fluviales que connaît la Loire depuis environ une centaine d'années (figure 30)

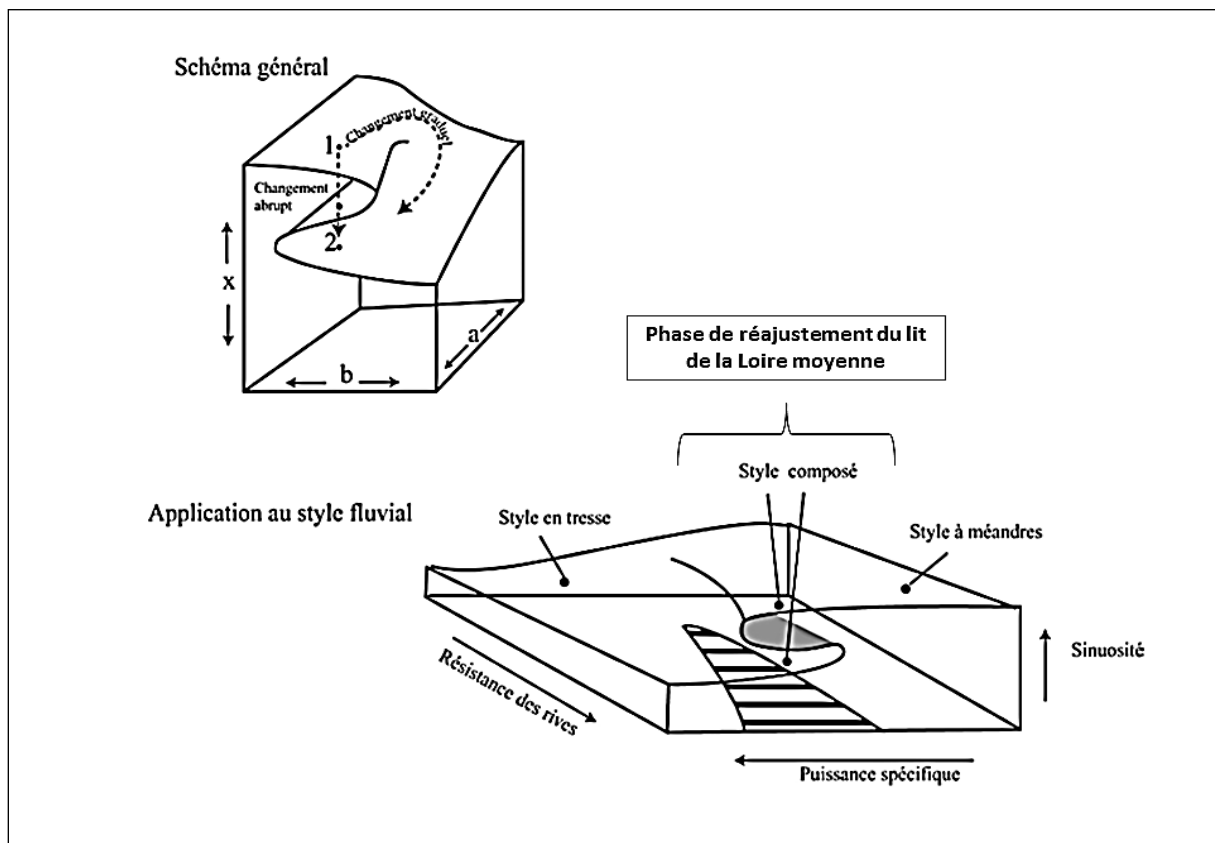


Figure 175. Représentation dans un système tridimensionnel des deux points d'équilibre selon le modèle de Graf et rapprochement avec le cas de la Loire moyenne.

Les variables prises en compte dans ce modèle sont : la puissance spécifique, la résistance des berges et la sinuosité. (Source : d'après Graf 1979 in Blonchon, 2009 modifiée).

2.2 Classification des principaux styles fluviaux et mise en relation avec la géométrie du lit de la Loire moyenne

Les cours d'eau disposent de la faculté de s'adapter aux fluctuations des variables internes et externes, cela à travers le changement de forme du lit. Les travaux entrepris afin d'effectuer une classification des styles fluviaux sont relativement nombreux (**Leopold et Wolman, 1957 ; Schumm et Khan 1972 ; Schumm 1977 ; Rust, 1978 ; Mollard, 1973 ; Brice, 1984 ; Knighton et Nanson, 1993 ; Rosgen, 1996**). Pour distinguer les différents styles fluviaux ces auteurs se sont fondés sur les caractéristiques physiques et granulométriques des systèmes fluviaux (largeur de la plaine alluviale, pente du fond du lit, largeur du lit mineur, sinuosité, granulométrie et puissance spécifique). On distingue quatre principaux styles fluviaux : les lits rectilignes, à méandres, en tresses et les lits anastomosés. Dans la réalité il existe une gamme très étendue de types intermédiaires (**Bravard et Petit 1997**).

- **Les rivières à lit rectiligne** se caractérisent par un lit d'écoulement unique. On distingue deux types de rivières à :

lit droit et profond, des berges hautes par rapport à la largeur du chenal. Le transport de la charge solide par suspension prédomine par rapport au charriage,

lit sinueux, caractérisé par une alternance de seuil et mouille. Les seuils sont constitués de matériel alluvial grossier. Le chenal d'étiage sinue entre les bancs de sable en période de débit moyen.

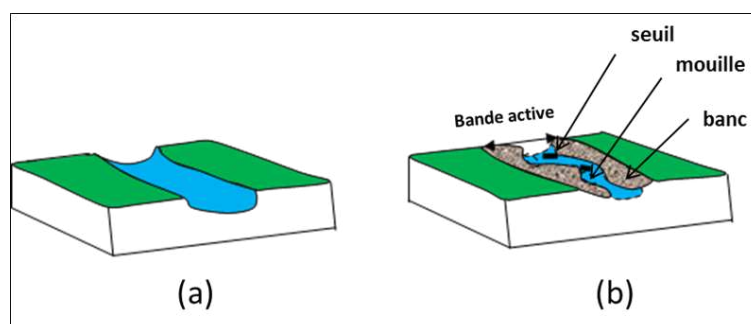


Figure 176. Rivières à lit unique : (a) rectiligne, (b) à lit mineur sinueux

- **Les rivières à méandres** disposent d'un lit unique très sinueux et asymétrique. Ce style fluvial se développe dans des secteurs à faible pente (faible capacité de transport de la charge solide). La formation du méandre est étroitement liée à l'impact des courants hélicoïdaux. En effet, la répartition des vitesses des courants au sein d'une courbe de méandre est inégale. Il existe un courant de surface rapide présentant un angle d'attaque vers la berge concave et un courant de fond plus long orienté tangentielllement à la rive convexe, ce qui explique l'érosion de la berge concave et le dépôt de sédiments au niveau de la berge convexe (figure). Cependant la formation de méandre ne dépend pas seulement de l'action des courants, la résistance des berges à l'érosion et la pente de la vallée sont aussi des éléments qui peuvent influencer le tracé méandrique du cours d'eau (**Yalin, 1982**).

La dynamique « érosion-dépôt » assure la migration latérale des méandres suivant un tracé ondulatoire (dissipation de l'énergie du fleuve), elle provoque dans certain cas le recoupement du méandre. Ce recoupement est considéré comme la phase « finale » de l'évolution des méandres. Il en résulte de cette évolution la création de bras morts. Selon **Hickin et Nanson (1975)**, la vitesse de migration du méandre croît avec la croissance du rayon de courbure. Cependant il existe un seuil au-delà duquel cette situation s'inverse, il s'agit du recoupement du méandre. Ces auteurs définissent le seuil de recoupement du méandre à une valeur critique de l'ordre de 2,5 à 3. Cette valeur résulte du rapport entre le rayon de courbure et la largeur du chenal (indice de maturité) (figure 33)

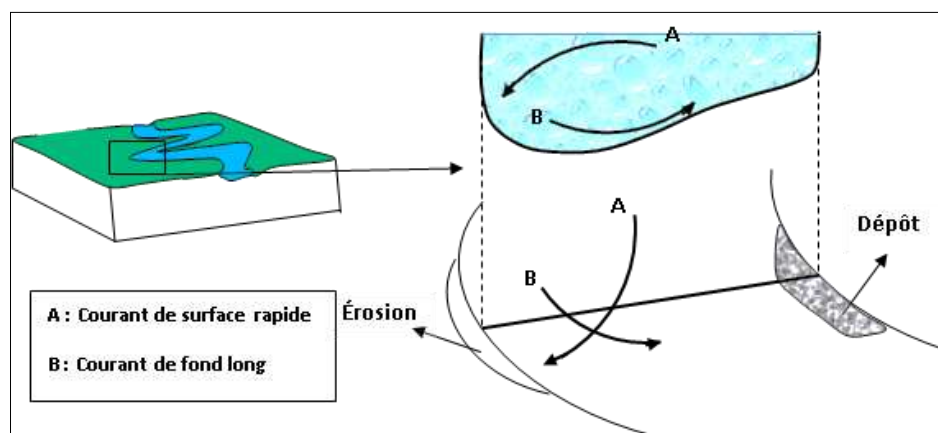


Figure 177. Exemple de rivière à méandre

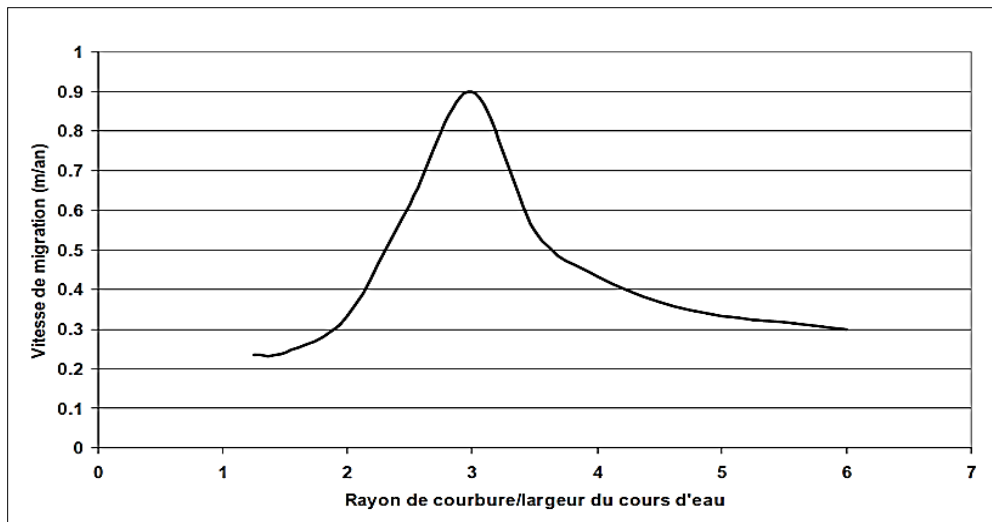


Figure 178. vitesse de migration des méandres. D'après Hickin et Nanson, 1975

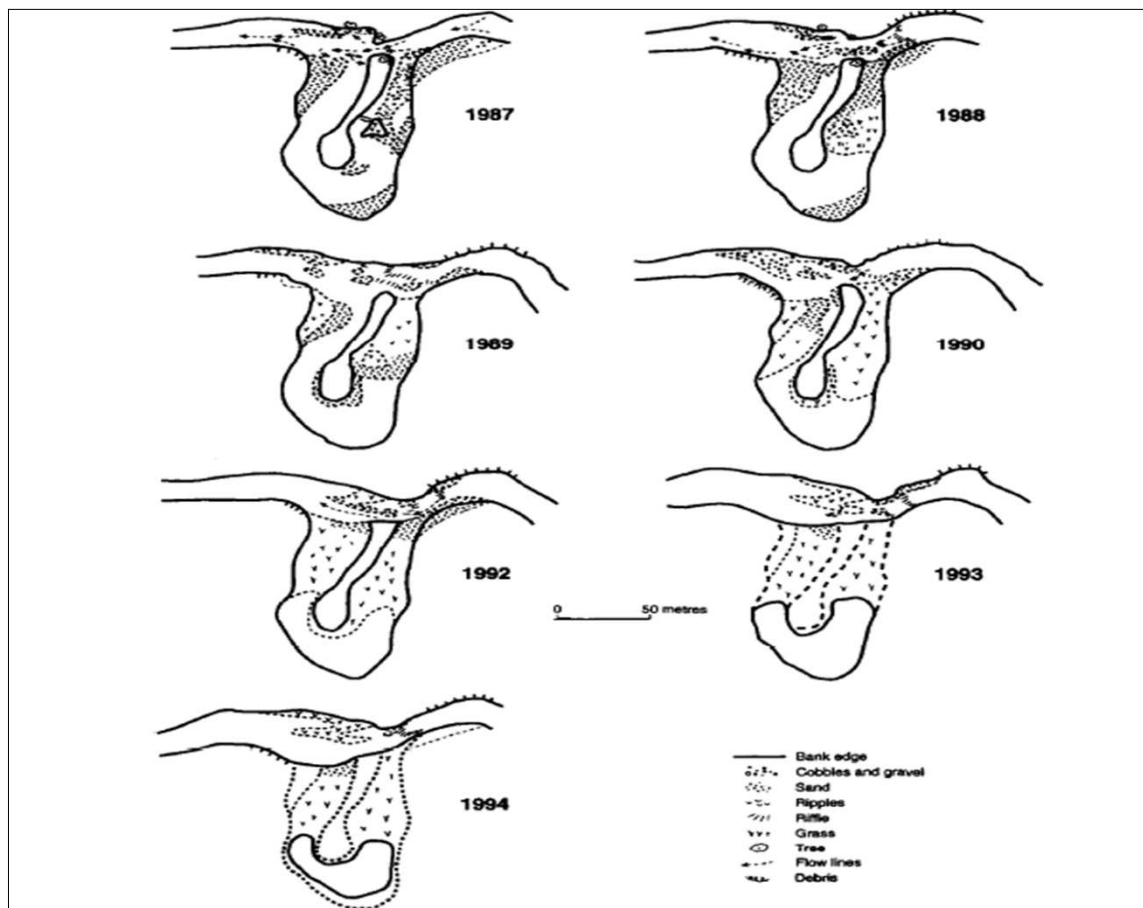


Figure 179. Exemple des étapes de recoupement de méandre sur la rivière Dane (Hooke, 1995).

- **Les cours d'eau en tresses** se caractérisent par une multitude de chenaux entrelacés et instables. Les chenaux sont séparés par des bancs de sable et des îlots généralement peu végétalisés. Ce type de rivière se développe dans des milieux à fort apport de charge solide et débit liquide et forte énergie. Le rapport « largeur du lit / profondeur » est élevé (dépasse 100). Quant à la pente du fond du lit, elle est prononcée, ce qui permet d'augmenter la puissance du cours d'eau (**Leopold et Wolman, 1957**). Le fond du lit est constitué d'alluvions grossières. La mobilité latérale du lit est assurée par l'érosion des berges. Ces dernières constituent une source d'alimentation de sédiments. Les crues sont susceptibles de régénérer les formes en plans (remaniement des bancs, érosion des berges) et rajeunissement de la végétation alluvial.

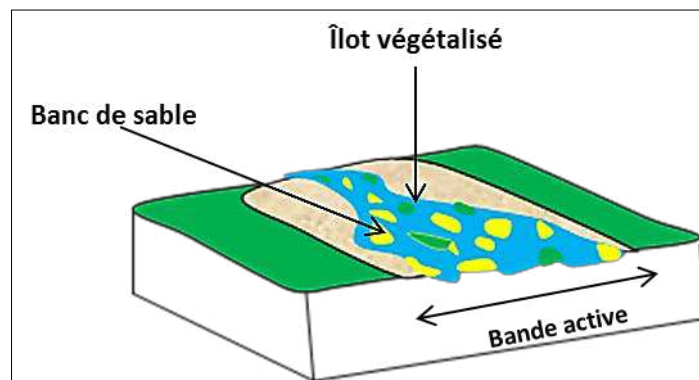


Figure 180. Exemple de rivière en tresse

- **Le style fluvial anastomosé** se développe dans les régions à faible pente. Il est constitué de chenaux multiples mais stables séparant des îles de grande taille par rapport à la largeur des chenaux (**Knignton et Nanson, 1993**). Ces chenaux sont sinueux, profond et étroit. Le transport solide est caractérisé par la prédominance de la charge fine. Les chenaux s'exhaussent lentement par l'effet de la charge en suspension. Les berges présentent une stabilité (cohésion) limitant ainsi l'action de l'érosion. Les conditions favorables de formation de l'anastomose ne sont pas encore bien cernées. En raison du manque d'études concernant ce style fluvial, (on dispose de peu de données sur les rivières anastomosées) Selon **Knignton et Nanson (1993)**, leurs origines sont non climatiques du fait de leurs présences dans des régions à climat différents (**Makaske, 2001**).

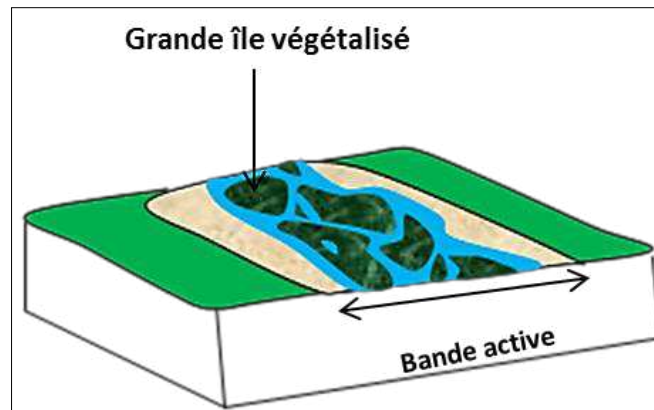


Figure 181. Exemple de rivière à lit anastomosé

- **Le style fluvial en anabranches** se caractérise par un tracé particulier des chenaux secondaires par rapport au chenal principal. Les bras secondaires diffluent du bras principal au niveau de la connexion amont, ils peuvent parcourir des distances importantes (plusieurs kilomètres) avant de rejoindre à nouveau le chenal principal. Ce style fluvial n'est pas facilement distingué du style fluvial anastomosé. **Knighton et Nanson (1996)**, définissent ce style fluvial comme système à chenaux multiples séparés par des îles occupées par une végétation semi-permanentes. Ces îles sont excisées de la plaine d'inondation ou formées par comblement des chenaux. Ces auteurs Proposent (en se basant sur d'autres travaux antérieurs : **Leopold et Wolman, 1957 ; Schumm 1977 ; Rust, 1978 ; Brice 1984 ; Church, 1983 ...**) une typologie des systèmes en anabranches en englobant les systèmes anastomosés et autre systèmes similaires. Ils distinguent six types :

Type 1: les rivières anabranches à sédiments cohésifs (les rivières anastomosées), ce sont les rivières anastomosées classiques de largeur relativement uniforme et étroite, avec des pentes faibles et des berges stables et cohésives (**Smith et Smith, 1980 ; Rust, 1981**). Ils sont souvent, sinueux et de faible migration latérale (presque aucune migration latérale). Leur puissance spécifique est très faible, habituellement inférieur à 8 W m^{-2} . Cette catégorie de rivière est divisée en trois sous-types en fonction de l'environnement et la nature des sédiments associés.

Type 2 : les rivière anabranches à charge sableuse, ce type de rivière est caractérisé par la prédominance des sables (et les limons plus fine près de la surface des plaines inondables). La sinuosité des chenaux est très faible. La puissance spécifiques varie entre $4 \text{ à } 8 \text{ W m}^{-2}$,

elle reste relativement faible même en périodes de crues (inférieur à 12 W m^{-2}) en raison de la pente relativement faible. Par contre la mobilité latérale est assez forte du fait de la faible résistance des berges à l'érosion. La forêt alluviale semble être essentielle pour la stabilité latérale du lit, sans laquelle les chenaux auraient probablement développé un style fluviale en tresse.

Type 3 : les rivières anabranches à charge mixte, ce sont des rivières sinueuses véhiculant une charge de fond sableuse ou graveleuse et charge en suspension limoneuse. Ces chenaux sont dotés d'une mobilité latérale assez forte du fait d'une puissance spécifique qui peut atteindre 50 W.m^{-2} dans les chenaux principaux.

Type 4 : les rivières anabranches à chenaux rectilignes et à îles sableuses en arêtes (des régions arides d'Australie centrale), le rapport « largeur / profondeur » des chenaux est faible. Les îles séparant les chenaux sont longues et étroites (2 à 4 m de haut, 10 à 30 m de large et 50 à 1500 m de long). La puissance spécifique est comprise entre 15 et 35 W.m^{-2} . La végétation est essentielle pour le maintien des crêtes de sable. Par ailleurs, la persistance de nombreuses crêtes parallèles sur plusieurs kilomètres du chenal dans certaines parties des cours d'eau du centre et du nord de l'Australie doit vouloir dire que c'est la forme la plus stable du chenal et permet de considérer cet état comme un état d'équilibre.

Type 5 : les rivières anabranches véhiculant des graviers et galets, ce sont des rivières à forte mobilité latérale en raison de leur forte puissance spécifique (comprise entre 30 et 100 W.m^{-2}). Ces rivières sont qualifiées par les anglo-saxons de « wandering gravel-bed river » ou « le style vagabond ». Selon Church (1983) et Desloges et Church (1989), ce style fluvial « errant » est décrit comme une transition entre le style à méandre et le tressage.

Type 6 : les rivières anabranches à galets et blocs, ce sont des rivières de régions montagneuses. Les processus par lesquels l'anabranchement est formé semble être similaire au (type 5) embâcles, et / ou l'accumulation de sédiments étant les principales causes. La puissance spécifique est relativement élevée ($100 - 300 \text{ W.m}^{-2}$) en raison des fortes pentes. Le cours d'eau est stable du fait de la nature grossière du substrat.

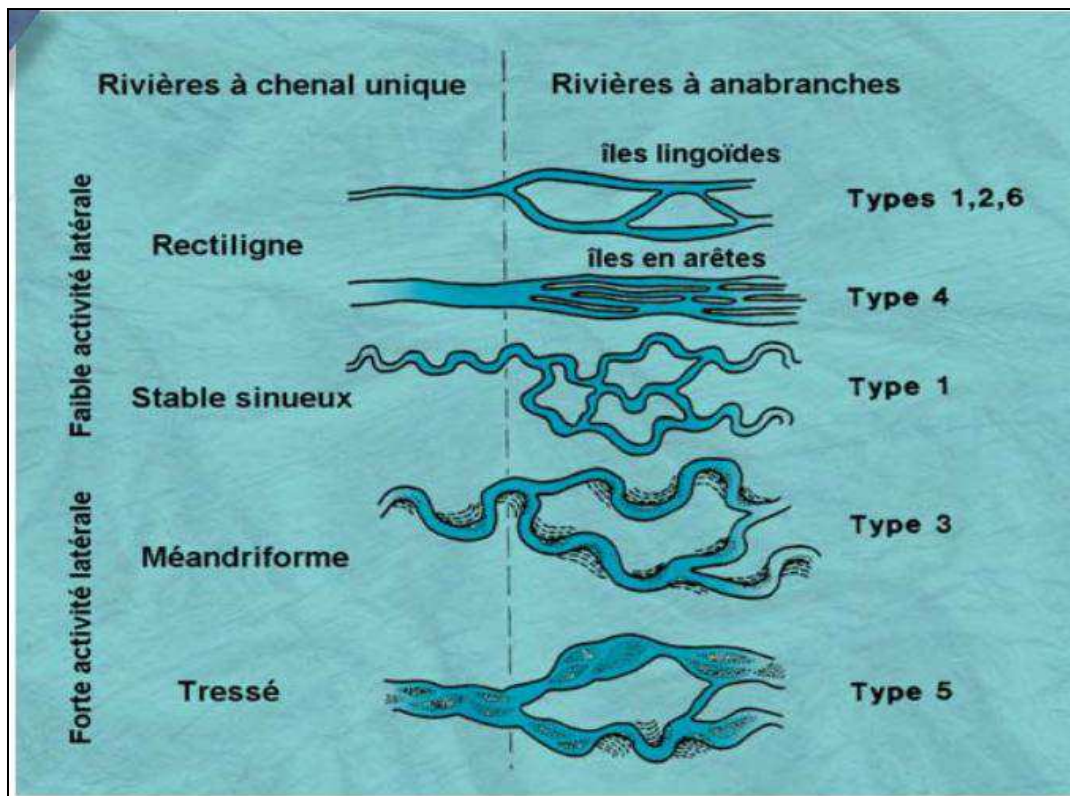


Figure 182. Les six types de systèmes à anabranches d'après Nanson et Knighton, 1996. Une répartition réalisée en fonction de la forme et de l'énergie des rivières (Source : Malavoi et Bravard, 2010)

Les critères de classification des styles fluviaux

Nous présentons quelques méthodes établies dans le but de distinguer les principaux styles fluviaux au cours des 60 dernières années, et les appliquer à différentes sections de la Loire.

- Classification de **Léopold** et **Wolman** (1957) : suite à des études réalisées sur des rivières américaines et indiennes, ces auteurs proposent une méthode de classification basée sur les critères suivants : la pente longitudinale du fond (I) et le débit à plein bord (Q^{pb}). Ces auteurs ont établi une formule pour distinguer les rivières en tresses de rivière à méandres :

$$(I = 0,012 Q^{pb-0,44})$$

En 1963 **Henderson** modifie cette formule en ajoutant la taille moyenne des sédiments composant le fond du lit (d_{50}), il en résulte de cet ajustement une nouvelle formule :

$$(I = 0,5 d_{50}^{1,14} Q^{pb-0,44})$$

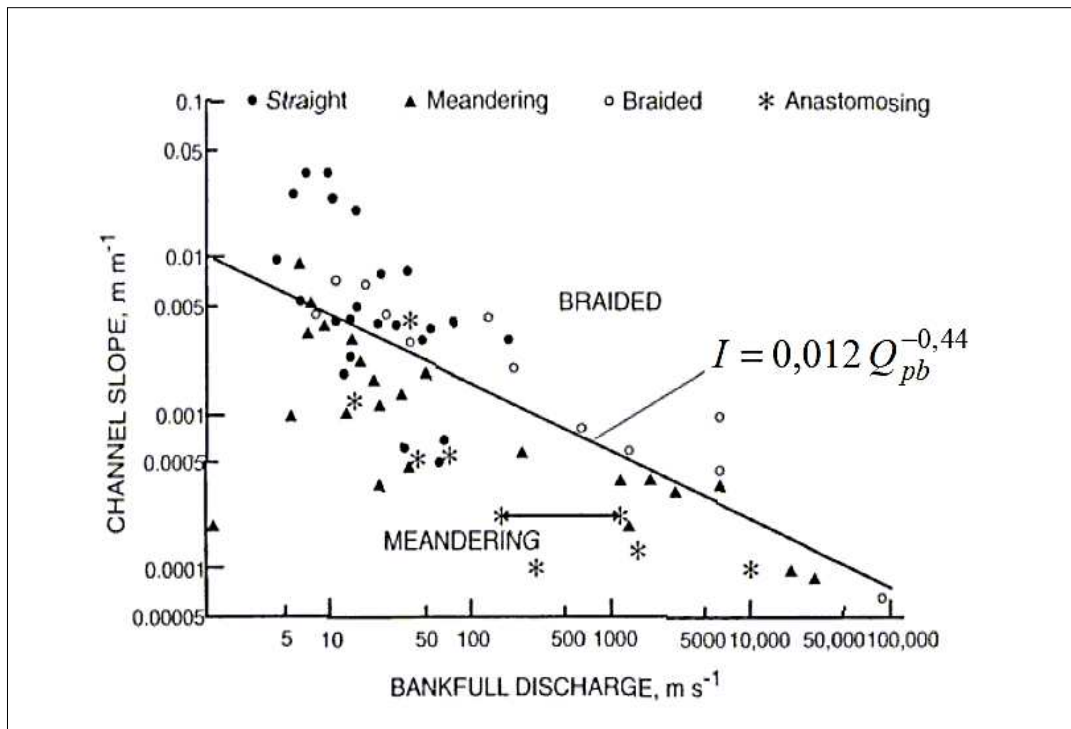


Figure 183. Classification des style fluviaux selon Léopold et Wolman (1957)

- Classification de **Brice** (1960, 1964) : l'auteur propose une classification réalisée en fonction des formes en plan et des degrés de : sinuosité, tressage et de l'anabranchement. Brice distingue sept types de chenaux dans la catégorie des chenaux sinueux, cette classification est établie en fonction du degré de sinuosité (dont les valeurs varient de 1 à plus de 1,26), la profondeur du chenal et sa largeur. Dans la catégorie des chenaux en tresse, **Brice** distingue quatre types de chenaux en fonction de du nombre des bancs et le nombre et la formes des îles. Le style fluvial en anabranchement est réparti en cinq types en fonction du nombre, la forme la sinuosité des chenaux et du degré de de l'anabranchement (varient de 0 à plus de 65 %). Cette classification propose au total 16 styles fluviaux.

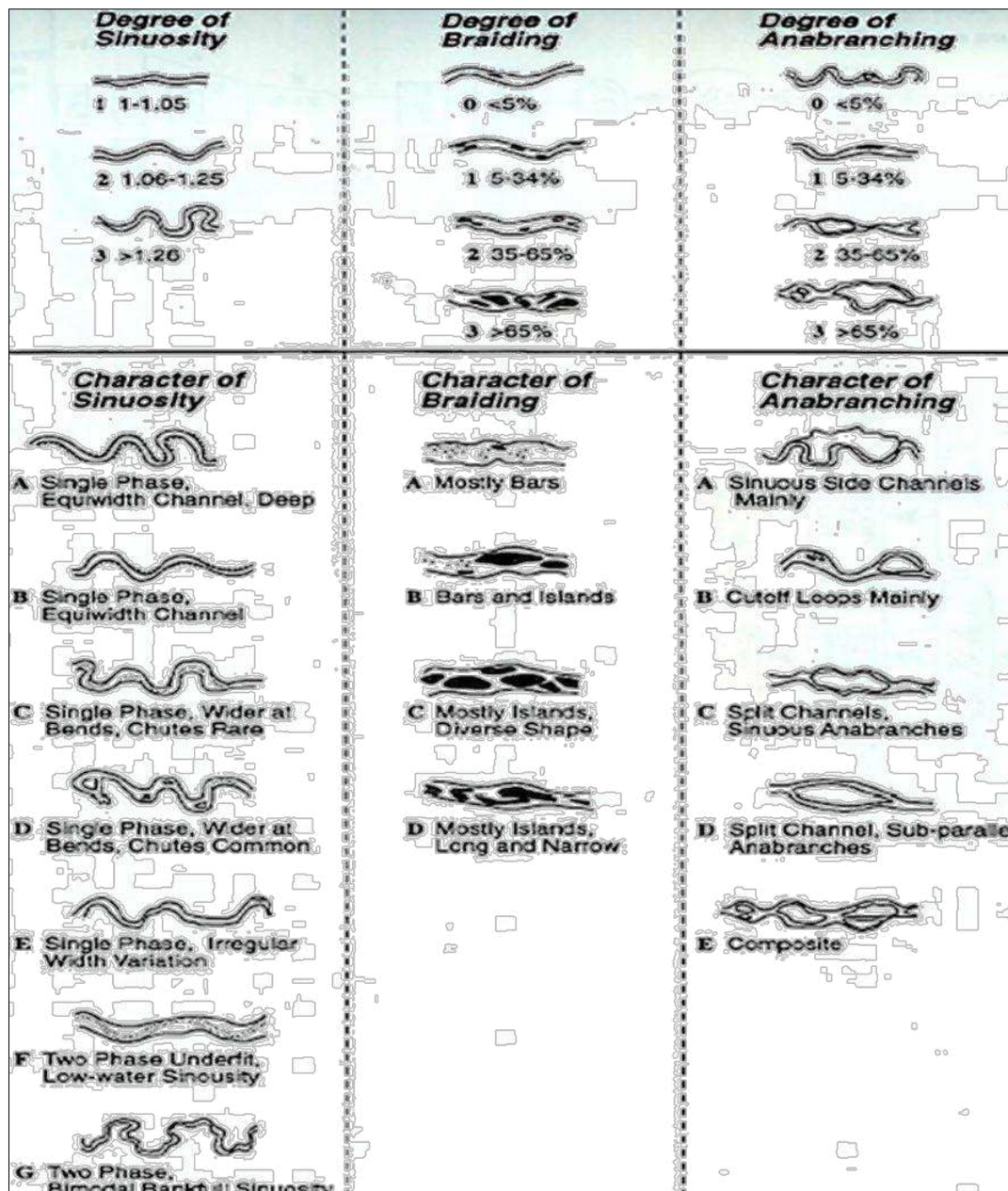


Figure 184. Illustrations de la sinuosité, tressage et l'anabranchement des styles fluviaux selon Brice (1960, 1964)

- Classification de **Rust (1978)** : cet auteur propose une classification plus large par rapport à celle de **Léopold et Wolman**. Il intègre le style fluvial rectiligne et établit une distinction entre le style en tresse et l'anastomose. Les critères de classification retenus dans cette méthode sont le nombre de chenaux et la sinuosité. Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 25. Classification des styles fluviaux en fonction de la valeur de l'indice de sinuosité. D'après Rust (1978)

Type de rivière	Nombre de chenaux	Indice de sinuosité
rectiligne	Un seul chenal	SI < 1,5
méandre	Un seul chenal	SI > 1,5
tresses	Plusieurs chenaux	SI < 1,5
anastomosé	Plusieurs chenaux	SI > 1,5

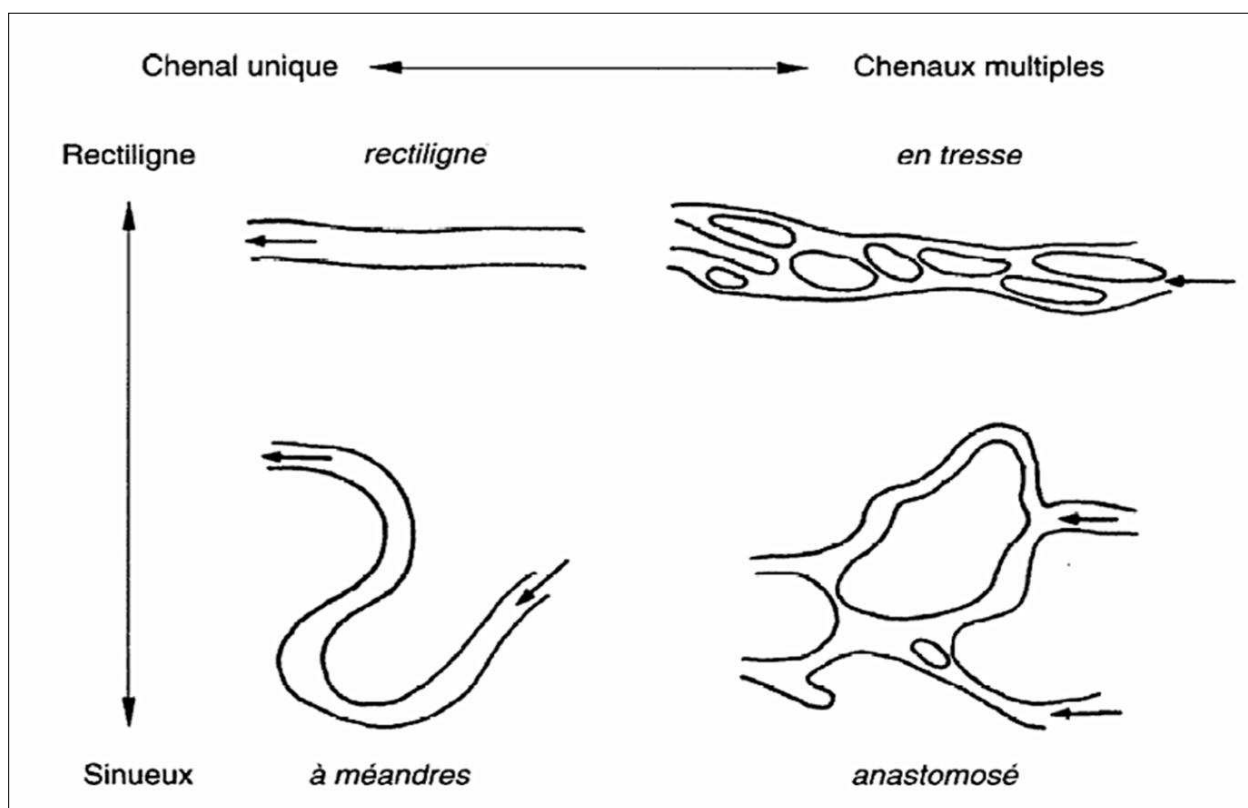


Figure 185. Classification des styles fluviaux en fonction de sinuosité et le nombre des chenaux. D'après Rust, (1978)

- Classification de **Schumm** et **Khan** (1972) : cette classification est conçue à partir d'un ensemble de mesures réalisé au laboratoire. Trois critères ont été pris en compte : la pente longitudinale du lit, la sinuosité et la charge solide transportée. Selon cette méthode, les rivières rectilignes se caractérisent par un indice de sinuosité inférieur à 1,05 et une pente longitudinale inférieure à 0,002 m/m. Pour les rivières à méandres l'indice de sinuosité est

supérieur à 1,05 et la pente longitudinale varie entre 0,002 m/m et 0,015 m/m. les rivières en tresses se caractérisent par un indice de sinuosité inférieur à 1,05 et une pente longitudinale supérieure à 0,015 m/m.

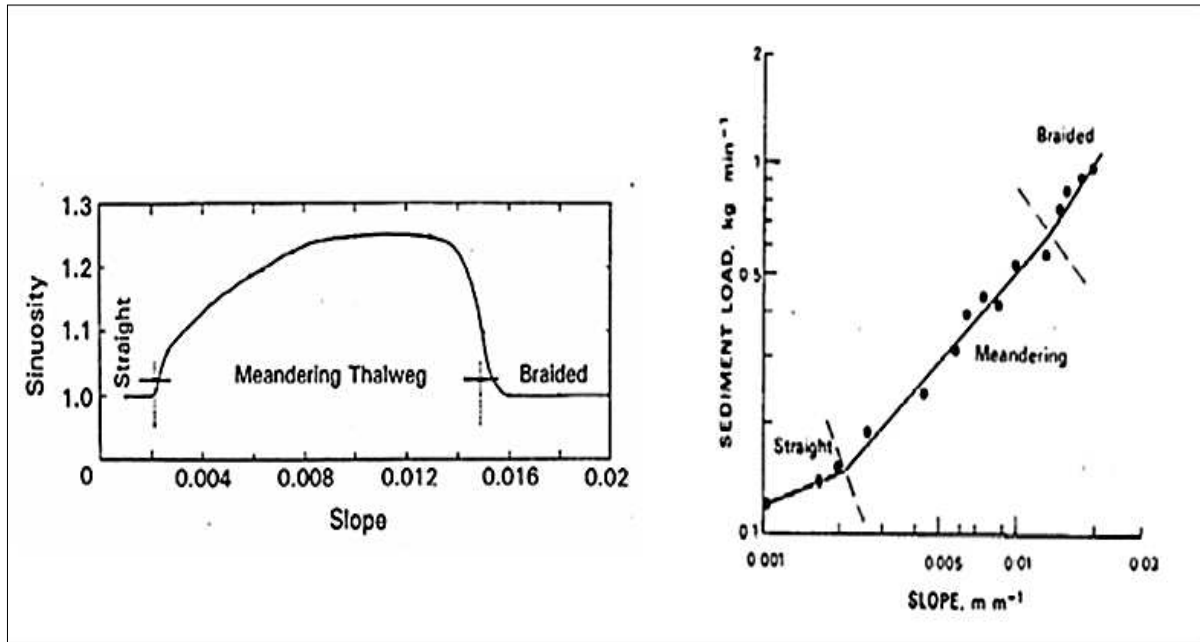


Figure 186. classification des style fluviaux selon les critères de sinuosité, la pente longitudinale et la charge solide transportée. D'après Schumm et Khan (1972).

- Classification de **Schumm** (1977, 1981) : dans cette classification, l'auteur définit 6 patrons fluviaux. Il propose une méthode basée sur des critères qualitatifs : le mode de transport solide dominant, l'énergie et la vitesse de l'écoulement, le rapport «largeur/profondeur » du lit et les caractéristiques granulométriques du fond du lit et des berges (l'auteur intègre les variables internes et externe du système fluvial) et la pente. L'auteur définit le seuil entre les lits sinueux et les lit fluviaux à méandres à 1.3. en 1981 **Schumm** propose une autre classification des styles fluviaux. Il détermine 14 styles fluviaux (figure et).

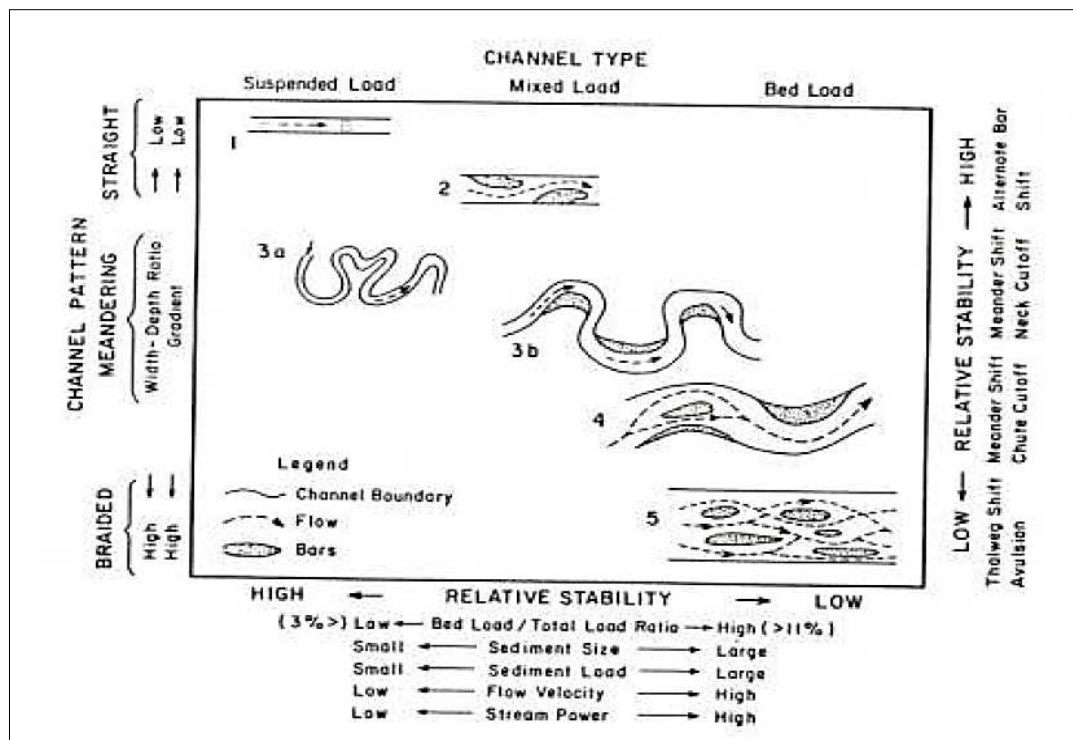


Figure 187. Modèle de classification des style fluviaux proposé par Schumm (1977)

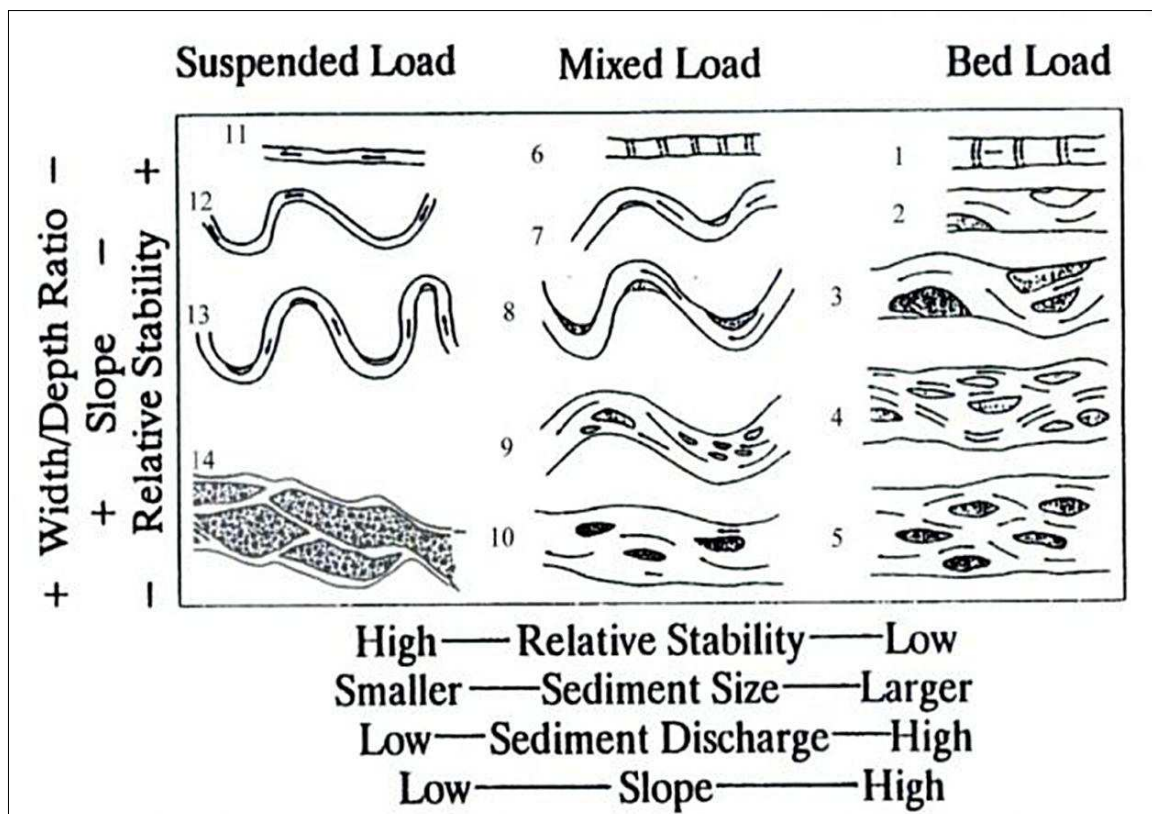


Figure 188. Modèle de classification des styles fluviaux. Proposé par Schumm (1981)

- Classification de **Rosgen (1996)** : cette méthode est établie à partir d'études réalisées sur de nombreuses rivières américaines. Le système de classification de Rosgen n'évalue pas la stabilité, mais décrit plutôt les types de rivières différents et quantifie leurs paramètres morphologiques. En introduisant de nouveaux paramètres, l'auteur définit huit principaux styles fluviaux et quatre-vingt-quatorze sous-types. Les paramètres utilisés pour effectuer cette typologie sont le rapport largeur de la vallée / largeur de la rivière, le rapport largeur du lit / profondeur déterminé pour le débit plein bord, la sinuosité, le nombre de chenaux, la pente et la granulométrie du fond du lit.

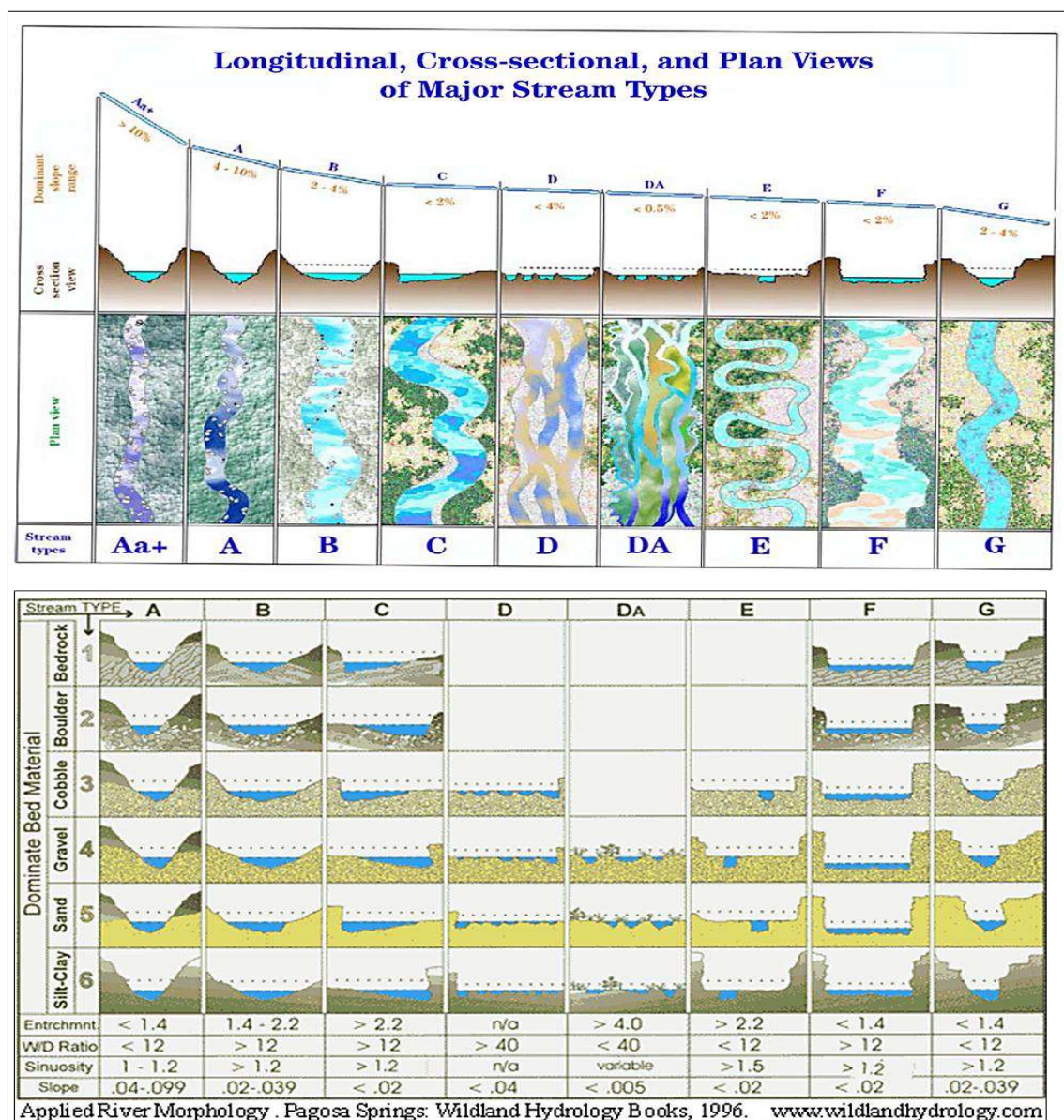


Figure 189. Classification des styles fluviaux d'après Rosgen (1996), vues transversales et en plan.

La classification des styles fluviaux a permis d'établir un vocabulaire commun entre les chercheurs. Elle a également mis en évidence deux catégories de rivières : les rivières à forte activité latérale regroupant les lits en tresses et à méandres et les rivières à faible activité latérale concernant les lits rectilignes et anastomosés. Le passage du style fluvial rectiligne vers le style en tresse (en passant par le style à méandre) correspond à un gradient croissant de l'énergie du cours d'eau.

Tableau 26. Caractéristiques physiques des trois principaux styles fluviaux (l'anastomose, tresse et méandres)

Characteristic	Anastomosing	Meandering	Braided
Gradient	Low	Moderate	High
Sinuosity	Variable	High	Low
Width-to-depth ratio	Low	Moderate	High
Per cent silt-clay	High	Moderate	Low
Lateral migration	Rare	Common	Common

Par ailleurs, **ces différents critères de classification sont été établis à partir de l'analyse des processus régissant la dynamique morphosédimentaire des rivières. Ils représentent de ce fait un outil efficace de gestion des systèmes fluviaux.** Nous présentons ci-dessous un exemple de modèle de restauration de rivière établie à partir de la méthode de Rosgen. Ce modèle est constitué de 8 phases principales : 1) la phase de restauration globale contient les objectifs, 2) définitions des caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques (interaction entre les différentes composante de l'hydrosystème), 3) analyse des caractéristiques physiques du bassin versant, 4) établir un protocole de gestion global, 5) mise en œuvre des actions de restauration et de préservation des milieux, 6) amélioration des conditions écologiques du milieu alluvial, 7) mise en œuvre et application, 8) suivi et entretien (figure 51).

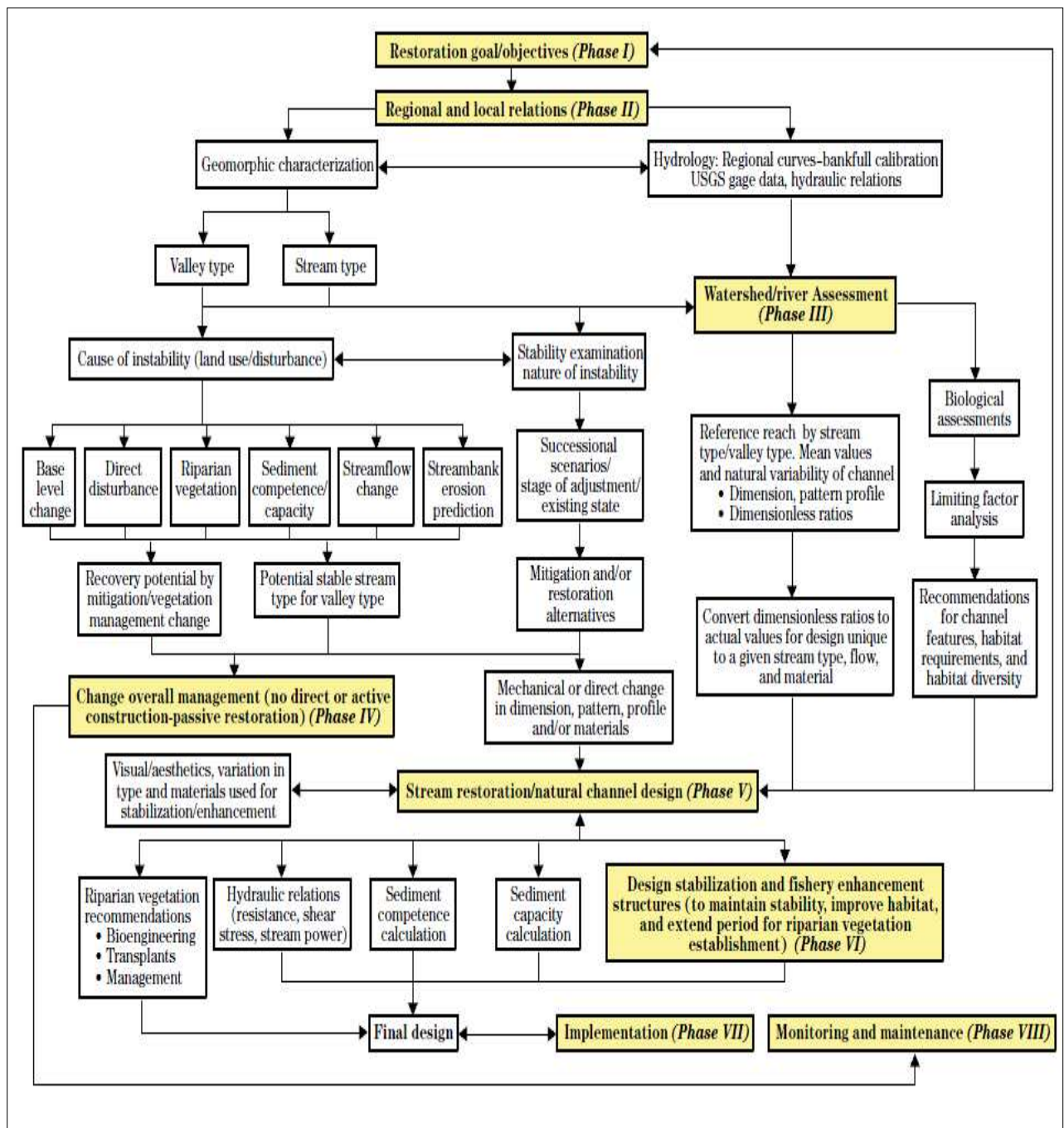


Figure 190. Exemple de modèle de restauration de rivière établie à partir de la méthode de Rosgen (1996).

La particularité du tracé de la Loire par rapport aux systèmes de classification.

La complexité des formes fluviales de la Loire ne peut pas s'inscrire dans une classification unique. En revanche, différentes sections étudiées correspondent à des types définis dans des classifications différentes.

Comme le décrit **Babonaux (1970)** : la Loire présente un visage beaucoup trop changeant pour n'avoir pu jamais s'inscrire dans une définition simple. L'auteur évoque la particularité du tracé de la Loire à travers la description de la géométrie des différents tronçons du fleuve. La répartition des styles fluviaux le long de la Loire est différente du schéma théorique qu'on retrouve dans la littérature, autrement dit, la succession chenal unique en gorges (dans le cours supérieur), en tresse, divagant et à méandres (dans le cours moyen) et anastomosé (dans le cours inférieur) n'est pas respecté dans le cas de la Loire. Les méandres se développent dans le cours supérieur alors qu'en aval, là où théoriquement, ils devraient se développer ils sont quasiment absents : une dizaine de kilomètres donnant l'impression d'une petite phase de transition entre un cours à chenaux multiples et un autre cours à chenal quasiment unique avant de se jeter dans l'océan Atlantique. La proximité des levées joue un rôle important dans l'évolution de la géométrie du lit.

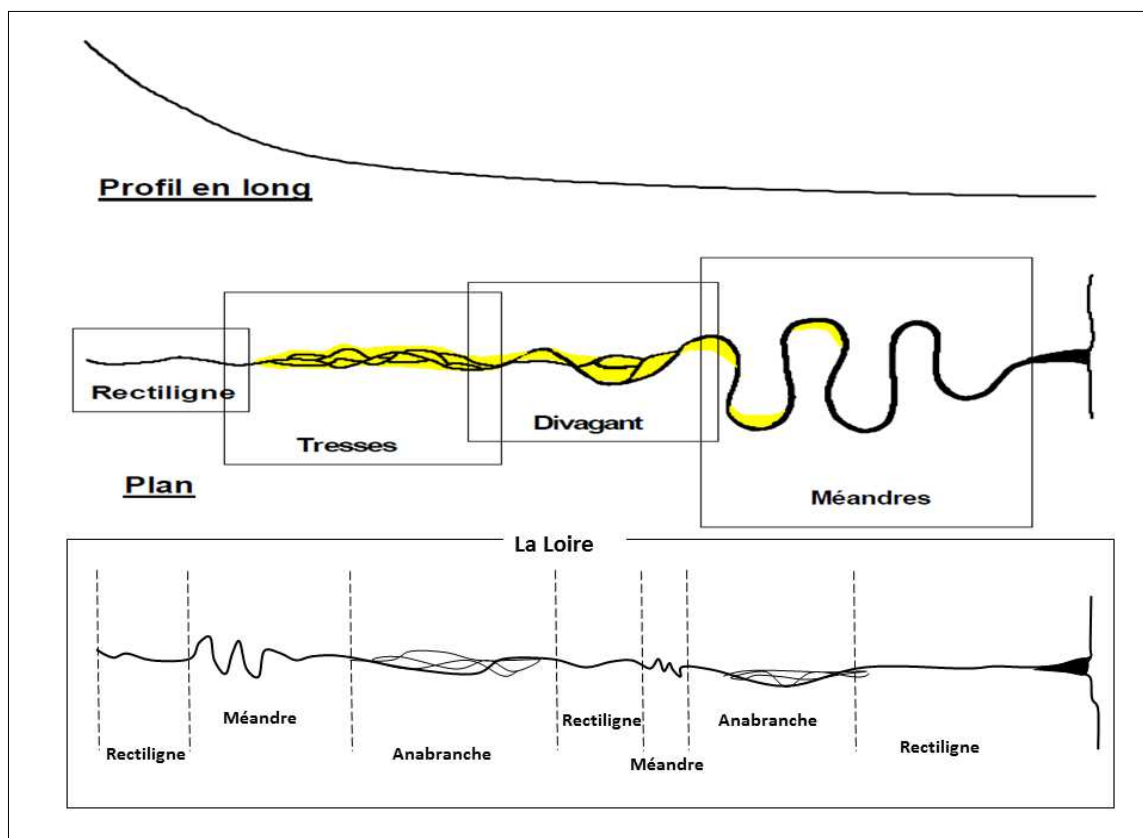


Figure 191. Une succession (amont-aval) de style fluviaux propre à la Loire, la répartition longitudinale des style fluviaux développés sur la Loire sont différents du modèle théorique proposé dans la littérature scientifique.

Une description plus détaillée des styles fluviaux développés sur le cours de la Loire est réalisée par **Gautier et Bazin (1996)**. Cette étude met en évidence la variabilité spatio-temporelle des interventions anthropiques et son influence sur l'espace de liberté du fleuve. Associé à un régime hydrologique particulier les actions anthropiques peuvent influencer fortement la dynamique morphosédimentaire du fleuve et par conséquent sa géométrie. La Loire montre à l'aval du Bec d'allier une plus grande stabilité, liée en partie à la présence des levées alors qu'en amont de sa confluence avec l'Allier le fleuve dépourvu de levées connaît une instabilité latérale. Cependant, la responsabilité de cette plus grande stabilité ne peut être exclusivement imputée aux levées qui, jusqu'à Briare, sont relativement éloignées du chenal actif. Selon ces auteurs, il s'agit dans ce cas d'un changement naturel de dynamique. Les types fonctionnels identifiés le long de la Loire sont :

- **La Loire amont** : un chenal unique traversant les gorges des hauts bassins de la Loire. A la sortie des gorges, le système à chenal unique est relayé par un style fluvial à chenaux multiples. Plus en aval dans le bourbonnais, la Loire développe un style fluviale à méandres très mobile (exemple : les méandres de Gilly). Ce secteur de val libre prend fin en amont de la confluence de la Loire et L'Allier.

- **La Loire moyenne** : à l'aval de Nevers et jusqu'à Briare, la Loire développe un style fluvial particulier : des bras multiples enserrent de grandes îles boisées. Selon Gautier et Bazin (1996), on pourrait assimiler ce style au modèle en anabranche décrit par Nanson et Knighton (1996). Le long de ce tronçon les levées sont discontinues et relativement éloignées du chenal. A partir de Briare, le fleuve marque son entrée dans un secteur où les levées sont plus proches du chenal. La Loire développe un style fluvial à chenal rectiligne (un chenal principal accompagné localement par un bras secondaire). Ce style fluvial est interrompu sur un cours passage (entre Saint Benoit et Orléans) où la Loire développe un style méandriforme (les méandres de Guilly à Saint Benoit) et un chenal à bras multiples comme à Montlouis.

- **La basse Loire** : un chenal unique (parsemé d'îles) marqué par une omniprésence d'ouvrages de navigation (épis, ports...). (Figure 53)

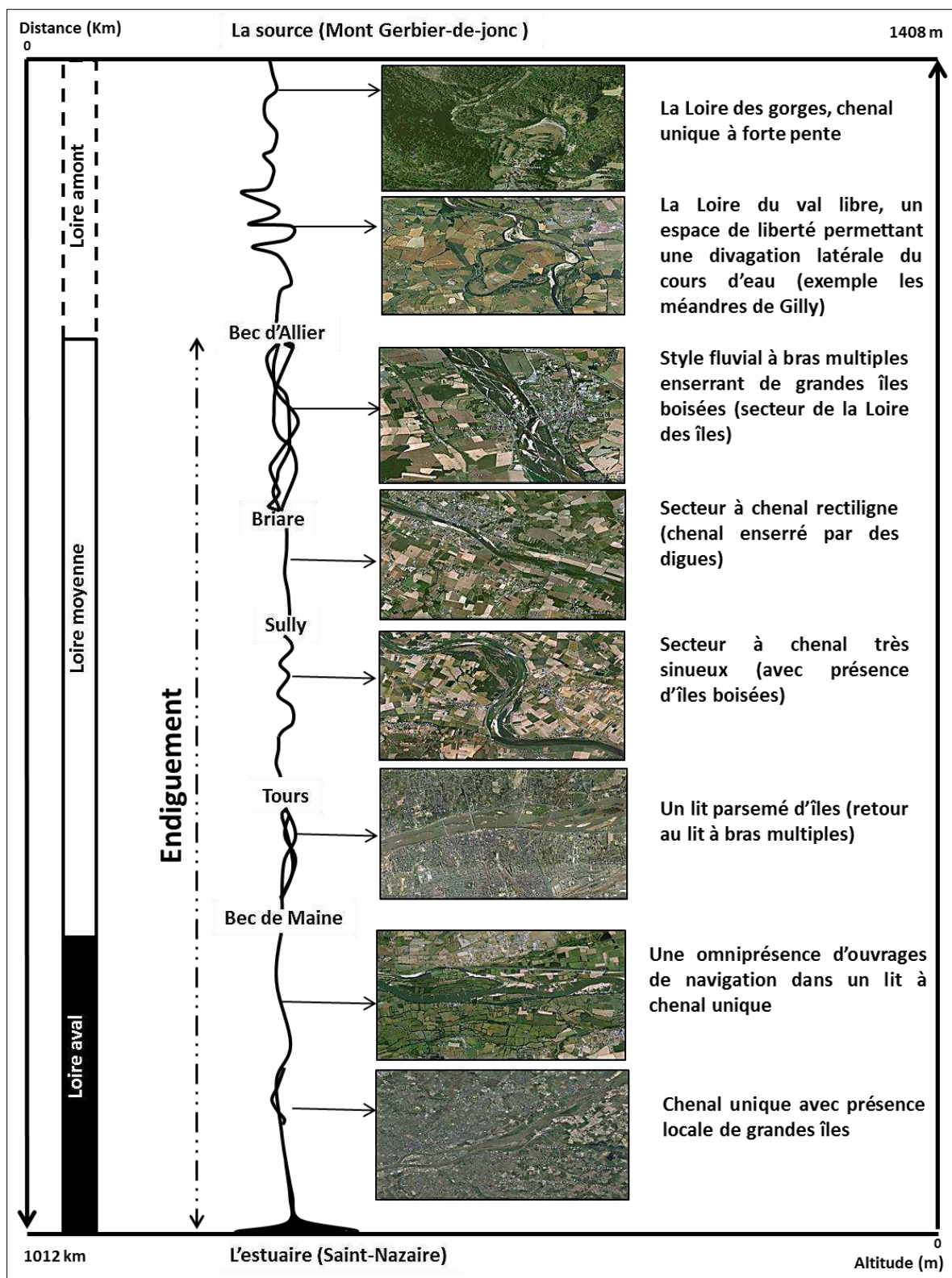


Figure 192. Typologie des principaux styles fluviaux développés le long du cours de la Loire. Les différents aménagements du lit (digues : plus proche du lit à partir de Briare, chevrette et d'huis) apparaissent à partir du bec d'Allier pour accompagner le cours d'eau jusqu'à l'estuaire.

c. Classification du style fluvial de la Loire moyenne

Cette classification concerne deux styles fluviaux différents développés au sein du cours moyen de la Loire : la Loire dite des îles (du bec d'Allier à Briare) où se trouve deux de nos sites ateliers (le site de la Charité-sur-Loire et Mesves) et le secteur des méandres de Guilly (en amont d'Orléans) qui représente notre troisième site d'étude. Nous allons tenter de déterminer la place qu'occupent les styles fluviaux développés dans nos secteurs d'étude au regard des différentes classifications citées précédemment. Notre analyse consiste à comparer les caractéristiques physiques et sédimentaires de la Loire (pente, puissance spécifique, granulométrie, géométrie du lit et formes en plan...) avec les critères utilisés par les concepteurs des différents modèles de classifications des styles fluviaux. Par ailleurs, il nous semble important de rappeler que ces modèles de classifications sont issus de travaux réalisés sur des hydrosystèmes différents et dans des laboratoires. Les conditions de leurs mises en œuvre sont bien différentes.

Le cas la Loire des îles :

Si en se réfère à la classification de **Léopold et Wolman (1957)** on constate que le style fluvial de la Loire (avec pente 0,0005 m/m et un débit plein bord d'environ 950 m.s⁻¹) se situe dans la phase de transition entre les deux principaux style fluviaux qui sont le style en tresse et le style à méandre.

Au regard du modèle de classification proposé par **Brice (1964)**, le style fluviale de la Loire se rapproche du type fluvial caractérisé par un degré de sinuosité compris entre 1,06 et 1,25, des caractéristiques de l'anabranch (B) et un degré d'anabranch compris entre 35 et 65 %. On peut considérer de ce fait le style fluvial de la Loire comme proche de l'anabranch.

Dans le modèle proposé par **Rust (1978)**, le style de la Loire semble difficile à classer. Au regard de la géométrie des formes du lit et à la stabilité des îles, on peut rapprocher le style de la Loire à l'anastomose. Cependant Rust définit l'indice de sinuosité dans le lit fluvial anastomosé en fonction d'une valeur supérieure à 1,5 alors que celui de la Loire est proche de 1,20. L'indice de sinuosité de la Loire la rapproche plus de celui des lits en tresse.

Dans la classification proposée par **Schumm** et **Khan (1972)**, le style de la Loire se trouve dans la zone des lits rectilignes tout en ayant un indice de sinuosité supérieur à 1,05. De ce fait la Loire possède des caractéristiques qu'on retrouve dans les style à méandres ($IS > 1,5$) et rectiligne (pente inférieure à 0,002 m/m)

Les typologies des styles fluviaux proposées par **Schumm** en 1977 et en 1981 (plus détaillée) tiennent compte des caractéristiques du transport solide (le mode de transport dominant, granulométrie), on ne dispose pas de ces informations sur la Loire. Cela rend difficile la comparaison. Cependant, si on se réfère à d'autres caractéristiques telles la stabilité des formes et la pente on constate que le style fluvial de la Loire possède des caractéristiques similaires à celles des lits dont le mode de transport dominant est la suspension : faible pente et une relative stabilité (proche des types 12 et 13). Quant à l'aspect morphologique du tracé (formes en plan), il se rapproche de celui des lits caractérisés par une charge mixte (numéro 10).

Comparée aux classifications précédentes, le modèle de classification des styles fluviaux proposé par **Rosgen (1996)** est plus détaillé et présente une large gamme de styles fluviaux. Nous avons pu distinguer dans les sous classes du style fluvial anastomosé un type de lit présentant des caractéristiques physiques et granulométriques proches du style fluviale de la Loire. Il s'agit du lit à dominante sableuse, à pente inférieure à $0,005 \text{ m.m}^{-1}$ et une sinuosité variable. La forme du profil transversal est proche de celle qu'on retrouve dans certain tronçon en Loire moyenne (un bras principal accompagné de chenaux secondaire séparé par des îles). Le style fluviale en question se trouve dans la classe (DA) (figure 193).

Dans le modèle de classification des lits fluviaux en anabranches proposé par **Knighton** et **Nanson** (1996), le style fluvial de la Loire n'est pas clairement défini. Au regard de certaines caractéristiques physiques et granulométriques, il nous est possible de rapprocher le style fluviale de la Loire du type 2 caractérisé par la prédominance des sables (et les limons près de la surface des plaines inondables) et une faible sinuosité des chenaux. Ce style fluvial (type 2) présente aussi des traits qu'on ne retrouve pas sur la Loire : la mobilité latérale devrait être assez forte, or dans le cas de la Loire la mobilité latérale est faible, cependant, elle est en partie réduite en raison de la présence de digues. Le second point de différence est la puissance spécifique, sur la Loire elle varie entre 11 et 12 W m^{-2} or, dans le style en anabranchement type 2, elle atteint des valeurs modestes comprises entre 4 à 8 W m^{-2}

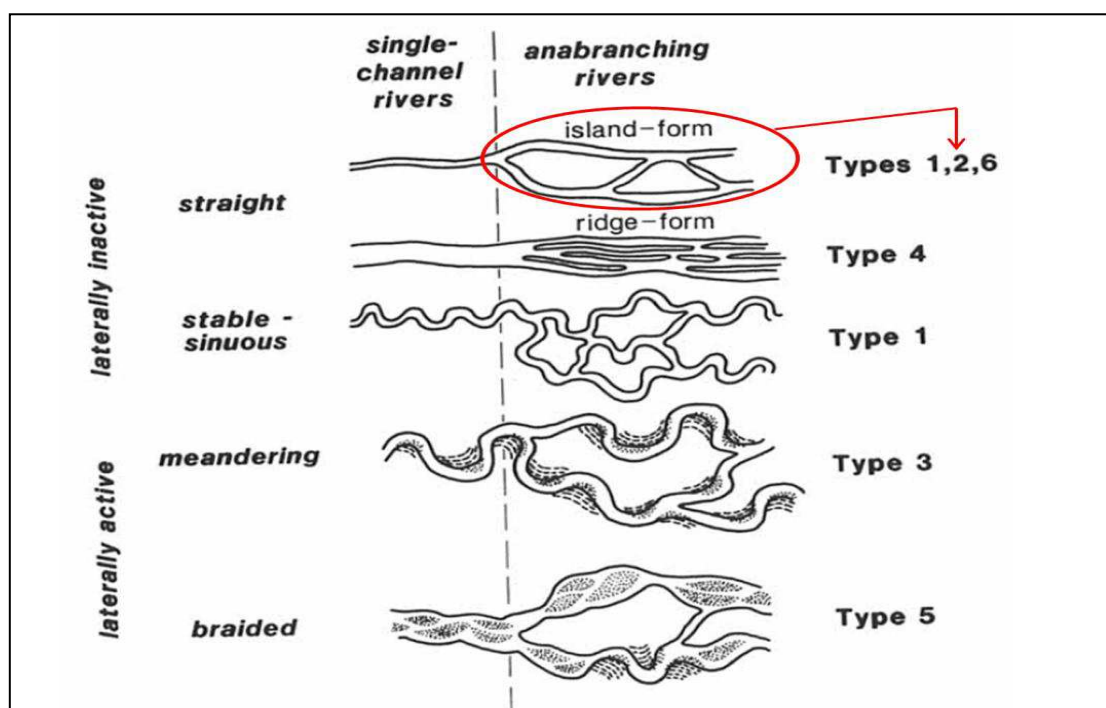


Figure 194. Rapprochement du style fluvial de la Loire au type 2 de la classification des lits en anabranches proposée par Knighton et Nanson, 1996.

Le cas des méandres de Guilly :

Dans ce secteur le tracé de la Loire se caractérise par une pente relativement faible ($0,0005 \text{ m.m}^{-1}$) et un indice de sinuosité de 1,3. Comparé au modèle de **Léopold** et **Wolman**

(1957), le secteur des méandres Guilly se situe près de la zone de transition entre le style à méandres et le style en tresse, soit une position similaire au tronçon de la Loire des îles.

Dans la classification de **Brice (1964)**, le style des méandres de Guilly correspond au style fluvial caractérisé par une sinuosité supérieure à 1,6 et au type de tracé (B) dont la largeur du lit ne change pas. On note aussi l'absence des îles dans ce type de chenaux alors qu'elles sont bien présentes dans notre secteur.

Schumm et Khan (1972), considèrent comme lits fluviaux à méandre les chenaux caractérisés par un indice de sinuosité supérieur à 1,05 et une pente inférieure à 0,002 m/m. en raison de la faible pente qui caractérise le secteur de Guilly ($0,0005 \text{ m.m}^{-1}$), ce tronçon est considéré au regard de cette classification comme lit fluvial à tracé rectiligne (malgré la valeur de l'indice de sinuosité qui dépasse largement 1,05).

Ruste (1978), considère comme chenaux à méandres (dans sa classification des styles fluviaux), les chenaux dont l'indice de sinuosité est supérieur à 1.5, si on se réfère à cette valeur, le secteur des méandres de Guilly sera placé dans la catégorie des chenaux rectilignes. Cependant, au regard de la géométrie du lit (forme en plan du tracé), on peut rapprocher le style fluvial de la Loire à Guilly plus du style à méandres que du style rectiligne. On est donc en présence d'un lit sinueux qui n'a pas encore atteint le stade de méandre.

Dans le modèle de classification des styles fluviaux conçu par **Schumm (1977, 1981)** le seuil entre sinuosité et méandres à 1,3. De ce fait le secteur des méandres de Guilly se trouve à la limite entre style fluvial sinueux et méandriforme (dans la phase de transition). Le tracé du type 9 (relative stabilité, charge solide mixte) semble se rapprocher le plus du tracé de la Loire à Guilly.

Le style de la Loire à Guilly se rapproche du type défini dans la classe (C) de la classification des styles fluviaux proposée par **Rosegen (1996)**. Ce type de chenaux se caractérise par une charge à dominante sableuse, une pente inférieure à 0,02, le rapport largeur/profondeur supérieur à 12 et une sinuosité supérieure à 1.2 (figure 195).

Définir clairement le style que développe la Loire sur son cours moyen semble donc difficile. Les résultats issus des différentes classifications laissent penser dans le cas de « la Loire des îles » à un style hybride proche de l'anabranchement ou de l'anastomose (sous partie de l'anabranchement) et qui possède selon certains modèles de classifications des caractéristiques d'autres styles fluviaux. On aboutit aussi au même résultat pour le site des méandres de Guilly, on est en présence d'un style fluvial très sinueux qui se place le plus souvent dans une zone de transition entre le style rectiligne et le style à méandres (**Brice, 1964 ; Schumm, 1977, 1981 ; Rust, 1978**) ou bien entre tressage et méandres (**Léopold et Wolman, 1957**).

Plusieurs points peuvent être avancés comme éléments ou hypothèses pour expliquer ce phénomène :

- les différentes conditions de mise en œuvre de ces modèles de classifications (type de cours d'eau étudié, sous quelle influence climatique et dans quels contextes géomorphologique, hydrologique et géologique) ;
- la prise en compte de l'action anthropique dans la conception de ces classifications, les conditions de la réalisation des modèles physiques (dans les laboratoires) peuvent être différentes de celle de la Loire ;
- le stade d'ajustement fluvial du lit de la Loire, les formes fluviales sont peut-être au cours d'une métamorphose ;
- dans le cas de la Loire, la forte influence anthropique agissant directement sur la géométrie du lit et sur les processus hydromorphologiques : on cite à titre d'exemple dans le site de Guilly, le rôle déterminant des sociétés riveraines dans la modification de la morphologie du lit à travers le mode d'occupation du sol (**Gautier *et al.*, 1998**). L'action anthropique semble être à l'origine de la formation du lobe de Guilly (récupération des terres pour des fins agricoles). L'analyse diachronique des formes fluviales réalisée dans le secteur de Guilly met en évidence le passage en l'espace de 40 ans (1809 à 1849) d'un lit multi bras parsemé d'île à un chenal sinueux unique qu'on retrouve encore de nos jours.

Un autre point nous semble important dans la métamorphose des formes fluviales, il s'agit de la présence de digues au niveau des berges concaves susceptibles d'assurer la migration latérale du lit (condition essentielle pour la formation et le développement des méandres par érosion latérale). Le mode d'occupation du sol est donc fortement impliqué dans le façonnement du paysage et des formes du cours d'eau à Guilly.

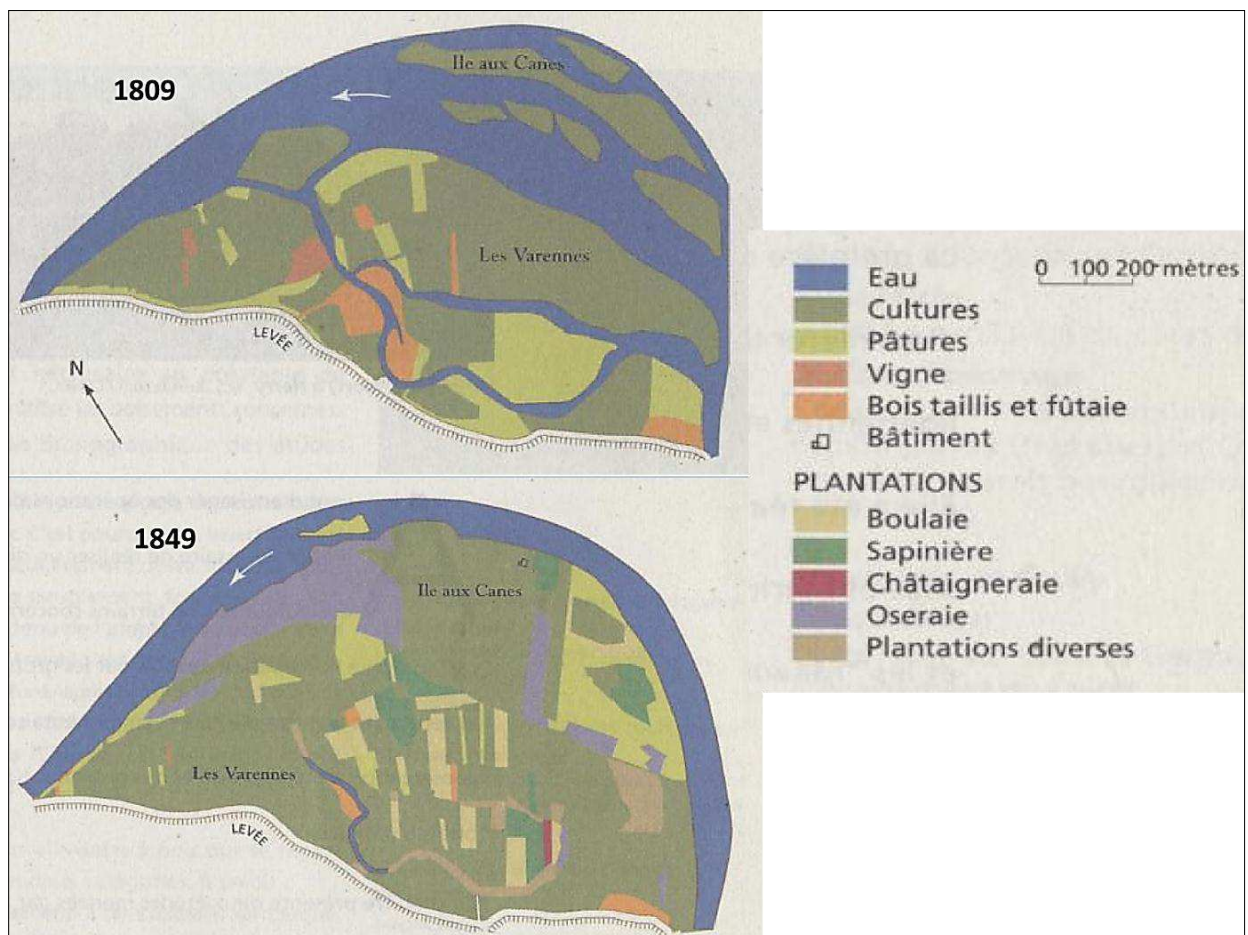


Figure 196. L'évolution de l'occupation du sol dans les méandres de Guilly entre 1809 et 1849.

Récupération des terres agricoles par comblement des bras secondaire, le lit de la Loire garde toujours la même forme aujourd'hui (source : Gautier et al., In Life Loire, 1998).

Optimisation des travaux de restauration du lit de la Loire

Pourquoi faut-il intervenir dans le lit de la Loire ?

L'évolution hydromorphologique du lit de la Loire est affectée par des modifications profondes des débits solide et liquide. Les actions anthropiques et l'apaisement climatique de la fin du petit Âge Glaciaire sont à l'origine de ces altérations. Le lit de la Loire est désormais encombré par de multiples îles et l'émergence d'une forêt alluviale presque continue donne un nouveau visage au paysage ligérien. Ces modifications ont un impact considérable sur l'équilibre écologique et hydro-sédimentaire de ce fleuve. La rétraction de la section mouillée favorise l'incision du plancher alluvial à travers la concentration des écoulements (augmentation des forces tractrices). Les conséquences de ces dysfonctionnements sont pénalisantes à différents points de vue : aggravation de l'inondation, abaissement de la ligne d'eau à l'étiage, appauvrissement de la diversité végétale et animale. L'incision du lit et l'extension de la forêt à bois dur peuvent amplifier les dégâts matériel en période de crue et augmente la vulnérabilité des sociétés riveraines au risque d'inondation. Le développement de la végétation dans le lit mineur réduit la capacité de ce dernier à évacuer les eaux de crues et favorise le débordement rapide dans la plaine d'inondation. Les embâcles formés par l'accumulation de troncs d'arbres représentent une menace à la stabilité des ponts. L'enfoncement en cours du lit de la Loire favorise la déstabilisation des Levées et des Ponts (à travers la formation de « renard » dans les levées et le déchaussement des piles des ponts). Sur la Loire moyenne et selon l'étude de 1998, 23 ponts avaient été jugés sensibles à ce risque, du fait du faible tirant d'air présent sous chacune de leurs arches. Le risque est bien sûr qu'une arche du pont soit bloquée ou que le pont se mette en charge engendrant une surcote à l'amont immédiat de l'ouvrage (Braud, 2012).

L'ouverture des bras secondaires est un moyen efficace pour lutter contre l'extension des îles et leur rattachement au franc-bord et favorise le transit sédimentaire des bras secondaire vers le chenal principal. Le maintien de ces annexes d'écoulement permet de réduire l'impact des crues à travers l'extension de la lame d'eau et de préserver la biodiversité.

L'ajustement contemporain des formes du lit de la Loire est une réponse à une interaction complexe de facteurs anthropiques et naturels favorisant le développement de la végétation au détriment de la bande active. Cela engendre une aggravation des inondations. En dehors de la nécessité de protéger les populations riveraine, la Loire a conservé une certaine biodiversité à la différence de la plupart des cours d'eau Européens (paysage riverain sauvage et pionnier) ce patrimoine mérite d'être préservé.

La complexité du fonctionnement des milieux rivulaires et la nécessité de mise en place d'une politique rigoureuse de gestion

La complexité du fonctionnement hydrosédimentaire de la Loire rend la tâche de restauration assez difficile. Les formes fluviales sont en mutation permanente et la vitesse de leur évolution dépasse parfois la fréquence des interventions humaines. S'ajoute à cela l'extension rapide du couvert végétal (et la présence de bancs de sables mobiles) qui va à l'encontre des objectifs tracés par les gestionnaires des travaux. Par ailleurs, il est important de mettre en évidence la faible expérience des intervenants. On peut donc considérer ces travaux comme des « opérations tests » permettant d'avoir une idée sur la réponse du fleuve à ces modifications. De ce fait, il nous est difficile de porter un jugement définitif sur l'efficacité de ces travaux. Le temps de réponse des formes fluviales dépend de leur échelle spatiale, selon A. D. Knighton (1984), « l'ajustement des microformes du lit se fait à l'échelle de la crue ou de la saison, celui des style fluviaux (notre cas) se fait à l'échelle des décennies ou du siècle ». Les travaux de restauration du lit de la Loire datent d'une dizaine d'années alors que l'altération du fonctionnement morphologique de ce fleuve dure depuis plus d'un siècle. La prise en compte du contexte d'évolution du fleuve (changement climatique, l'état des bassins amont, les extractions de granulat, l'arrêt d'entretien du lit...) et la compréhension fine du mode de fonctionnement hydro-sédimentaire actuel peuvent aboutir à une politique efficace de gestion de cet espace fluvial. Cela permet d'établir un plan de gestion détaillé fondé sur une démarche rigoureuse précédant la réalisation des travaux.

L'efficacité des travaux de restauration est étroitement liée à la compréhension du fonctionnement hydro-sédimentaire et à l'identification des éléments susceptible

d'influencé le flux solide et liquide (végétation, aménagements, conditions hydrologiques). Cela permet de : mettre en place un programme de planification spatiale et temporelle des zones d'interventions, hiérarchiser les sites d'intervention par ordre de priorité et optimiser l'efficacité des travaux, disposer d'un outil de gestion permettant le suivi des secteurs d'intervention à long terme et agir par ordre de priorité (secteur à enjeux majeur) et tenir compte des budgets destinés à ces opérations.

3.1 Modèle d'analyse pour améliorer les travaux de restauration

Depuis la mise en place du Plan Loire Grandeur Nature (1995), de nombreuses études visant l'amélioration de la gestion du lit de la Loire ont vu le jour. A l'échelle de la Loire moyenne, trois études ont été menées : l'étude réalisée en 2009 par SOMIVAL afin d'établir un programme de restauration et d'entretien du lit de la Loire en amont de Belleville-sur-Loire, l'étude réalisé par Hydratec, ASCONIT (2009) pour la définition et la programmation des opérations de restauration du lit dans la traversée du Département du Loiret et l'étude réalisé par **Braud et al** (2012) visant la mise en place d'une stratégie de restauration à partir d'indicateur à moyenne échelle (la largeur de la bande active). Ces études ont été réalisées pour répondre au souhait des gestionnaires du lit de la Loire (DREAL Centre, Service Loire et bassin Loire-Bretagne, DDT) de disposer d'outils d'aide à la décision afin de prioriser des actions de gestion du lit.

L'analyse que nous proposons tient compte des mêmes objectifs (amélioration des travaux de restauration). Elle est fondé sur une approche multiséculaire et implique de nombreux indicateur (les durée de submersion, la capacité de transport, la granulométrie, la géométrie du lit, la végétation). L'échelle spatiale de ce travail concerne un tronçon allant de Fourchambeau à Cosne-sur-Loire, soit un linéaire de km. Ce secteur à fait l'objet d'une étude d'impact des travaux de restauration (Nabet, 2006). Cela permet de suivre l'évolution des sites restaurés depuis les premiers travaux (1994). **L'objectif de cette analyse est la mise en œuvre de nouvelles méthode d'analyse afin d'établir un diagnostic précis préalable à une intervention. Cela afin d'apporter des éléments complétant les résultats des études précédentes et de renforcer les outils d'aide à la décision.**

a. Les indicateurs à moyenne échelle (secteurs fonctionnels)

Le rythme d'évolution spatial du couvert végétal et les durées de submersion des bras secondaires sont deux indicateurs permettant de fournir des éléments de compréhension de la dynamique hydro-sédimentaire à moyenne échelle. Ils permettent également d'effectuer une segmentation du lit en fonction du degré de végétalisation du lit, la mise en eau des bras secondaires et d'identifier les secteurs de restauration prioritaires. Les tronçons qui se caractérisent par une courte durée de submersion des bras secondaires et une forte extension du couvert végétal seront classés comme secteurs d'intervention prioritaire. **Cette approche nous permet de hiérarchiser les zones de restauration à l'échelle des secteurs fonctionnels et d'avoir une vision globale des sites d'interventions.**

L'évolution de la bande végétalisée

Nous nous appuyant dans cette approche sur les résultats de l'étude de l'évolution de la bande végétalisée réalisée par **Braud et al (2012)** à l'échelle de la Loire moyenne. Ces auteurs ont comparé la végétalisation du lit entre le début des années 90 (démarrage du Plan Loire Grandeur Nature et du programme d'entretien du lit) et aujourd'hui. Cette période correspond à la phase d'ajustement du lit après l'arrêt des extractions de sédiments dans le lit mineur de la Loire. Il en ressort de cette étude les résultats suivants :

- une nette augmentation de la végétation ligneuse au sein du lit mineur du bec d'Allier jusqu'au bec de Vienne
- une stabilisation de la situation en aval de la Vienne
- un gradient croissant « amont - aval » de la largeur minimum de la bande active, 120 mètres dans le tronçon bec d'Allier - bec de Cher (au droit des communes de Fondette, rive droite et La Riche, rive gauche), 170 mètres dans le tronçon bec de Cher -bec de Vienne (droit des communes de Bréhémont, rive gauche et Saint-Michel-sur-Loire, rive droite) et 340 mètres au sein du tronçon bec de Vienne - bec de Maine (site de Souzay Chapigny et le site de La Ménitré).

L'élargissement de la bande occupée par la végétation ligneuse est en moyenne de 25 mètres sur le linéaire étudié avec des élargissements ponctuels de parfois 180 mètres. Ces

résultats permet de déterminer en fonction du rythme du développement de la couverture végétale deux secteurs fonctionnels : un secteur à rythme d'expansion végétale élevé «bec d'Allier - bec de Vienne» et un secteur à faible développement du couvert végétal en aval de la Vienne. Les actions de gestion du lit devraient se focaliser en priorité sur le tronçon du lit situé entre le bec d'Allier et le bec de Vienne. Notre site d'étude se situe en amont de ce secteur (entre Fourchambeau et Cosne). On remarque d'après les résultats de cette analyse que les valeurs les plus importantes de l'élargissement de la bande occupée par la végétation sont enregistrées au niveau de notre site d'étude, soit 180 mètres. nous proposant une segmentation de ce secteur fonctionnel en utilisant les valeurs de l'élargissement de la bande végétalisée. Ce critère permet d'effectuer une hiérarchie des unités fonctionnelles selon leurs degrés de végétalisation et de délimiter les zones d'interventions prioritaires. On distingue quatre sous-secteurs :

Sous-secteur n°1 : concerne un linéaire allant du bec d'Allier à Pouilly, on enregistre dans ce tronçon les valeurs les plus importantes de l'élargissement du couvert végétal (180 m). On considère cette zone comme sous-secteur prioritaire d'ordre 1 (SSP1).

Sous-secteur n°2 : il s'agit des tronçons situés entre Gien et Orléans et entre Blois et Tours, la valeur maximum d'élargissement de la bande végétalisée avoisine 160 m. ces tronçons sont considérés comme sous-secteur prioritaire d'ordre 2 (SSP2).

Sous-secteur n°3 : on distingue dans cette catégorie trois tronçons, le premier s'étale de Pouilly à l'amont de Gien, le second concerne un linéaire d'environ 50 km situé en amont de Blois et le troisième s'étend sur environ 45 km en aval de Tours. La valeur maximum d'élargissement de la bande végétalisée avoisine 120 m. ces tronçons sont considérés comme sous-secteur prioritaire d'ordre 3 (SSP3).

Sous-secteur n°4 : concerne des secteurs où on enregistre les valeurs les plus faibles de l'élargissement de la bande végétalisée. Ces secteurs se situent aux alentours de Gien (environ 25 km), Orléans (environ km) et en aval de la Vienne (environ km). La valeur maximum d'élargissement de la bande végétalisée avoisine 70 m. ces tronçons sont considérés comme sous-secteur prioritaire d'ordre 4 (SSP4).

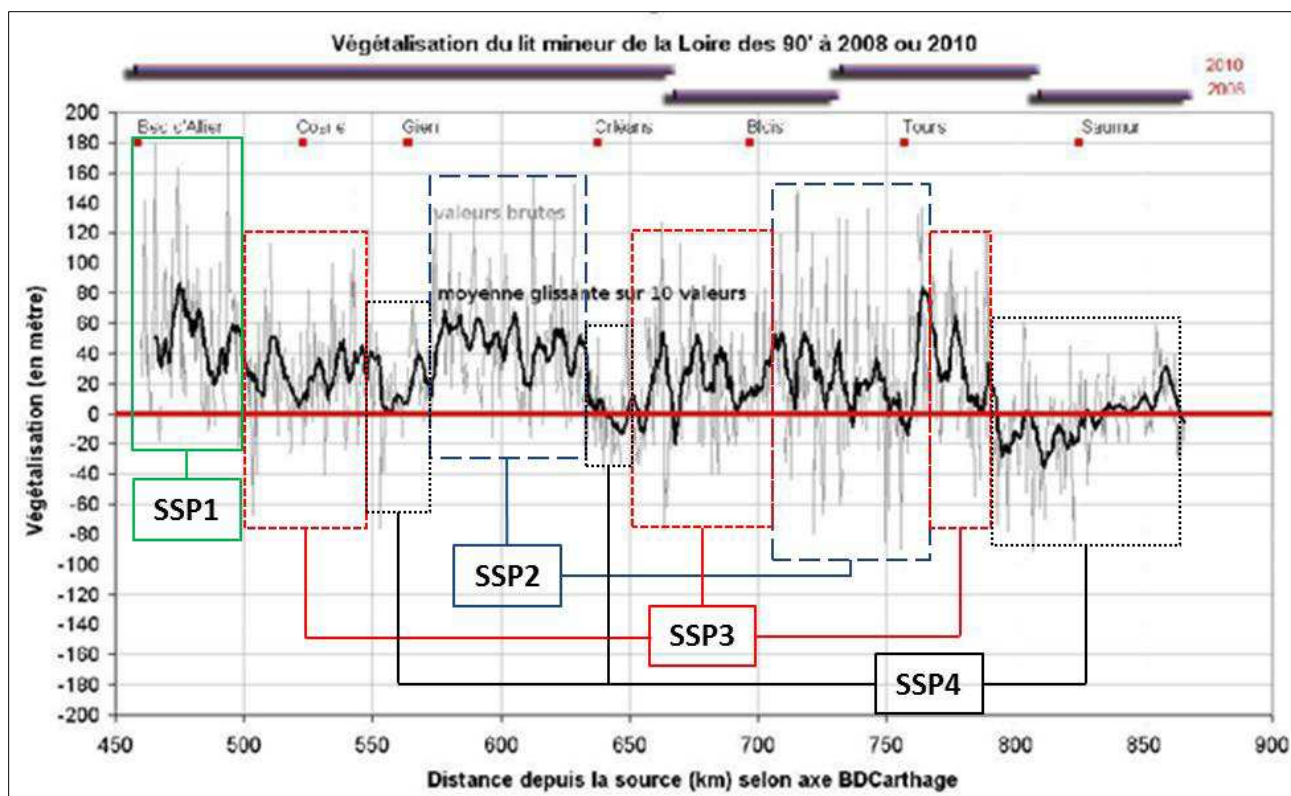


Figure 197. Exemple de segmentation d'un tronçon de la Loire moyenne en utilisant comme indicateur la largeur de la bande végétalisée (source : Braud et Latapie 2012, adaptée)

La durée de submersion des bras secondaires

Cette analyse s'effectue à l'échelle des sous-secteurs. Nous prenons comme exemple le linéaire de la réserve naturelle du val de Loire (de La Charité à Saint Sature), ce tronçon se situe dans le sous-secteur n°1. L'indicateur pris en compte est l'indice d'insularité des îles, il s'agit d'une évaluation du nombre de jours durant lesquels les îles n'étaient plus bordées d'eau, au moins d'une rive (Grivel, 2008). Cet indice n'est rien d'autre qu'un indicateur de durée de submersion des bras secondaires qui nous semble étroitement liée à l'efficacité des travaux de restauration. L'inégale insularité des îles renseigne sur les différences de submersion des bras secondaires et vice versa. De ce fait, on peut à partir des résultats relatifs à l'analyse du degré d'insularité des îles déduire les durées de submersions des bras secondaires et d'effectuer on fonction de ce critère une sectorisation de ces bras.

La mise en eau des bras secondaires limite l'extension de la végétation et favorise la remobilisation des sédiments et par conséquent la pérennité de ces annexes

d'écoulements. La question de la réactivation des bras secondaires est au cœur des préoccupations des gestionnaires.

Le résultat obtenu met en évidence trois ensembles présentant des caractéristiques hydrologiques différentes. Le premier ensemble (E1) concerne les secteurs de La Charité-sur-Loire (3,5 km) et Pouilly (4 km), la durée de submersion des bras secondaires est en moyenne 9 à 10 mois de l'année, le second ensemble (E2) s'étale sur environ 8 km, il concerne le secteur des loges et des barreaux (site de Mesves). Ce dernier est marqué par une durée de submersion inférieure à 9 mois/an. Le troisième ensemble (E3) présente un meilleur dynamisme de la bande active secondaire, la durée de submersion des bras secondaires est supérieure à 10 dans l'année. Ce secteur se situe en aval de pouilly sur environ 5 km.

L'ensemble (E2) est le secteur qui présente la plus faible activité hydrologique, il est de ce fait, susceptible de connaître un développement de la végétation à un rythme plus élevé que les deux autres sites. Le croisement de ces résultats avec ceux de l'évolution de la bande végétalisée (présenté précédemment) montre **une relation entre les durées de submersion des bras et l'extension spatiale du couvert végétal**. L'ensemble à faible activité hydrologique (E2) se situe dans le sous-secteur d'ordre prioritaire n°1(SSP1). Ce dernier se caractérise par une forte extension du couvert végétal. Dans l'ensemble (E3), les bras secondaires sont en eau presque toute l'année (plus de 10 mois/an), ce tronçon fait partie du sous-secteur d'ordre prioritaire n°3 (SSP3) caractérisé par une extension du couvert végétal plus faible que le sous-secteur n°1. Ce constat peut nous permettre de proposer une classification des ensembles selon leurs caractéristiques hydrologiques et aussi selon le degré de l'extension de la végétation, on place en premier l'ensemble E2 (site des Loges et Mesves) ensuite l'ensemble E1 (secteur de La Charité-sur-Loire et Pouilly) et enfin l'ensemble E3 (entre pouilly et Cosne). Cette classification permet de programmer les travaux et de cibler les secteurs d'interventions prioritaires (voir figure).

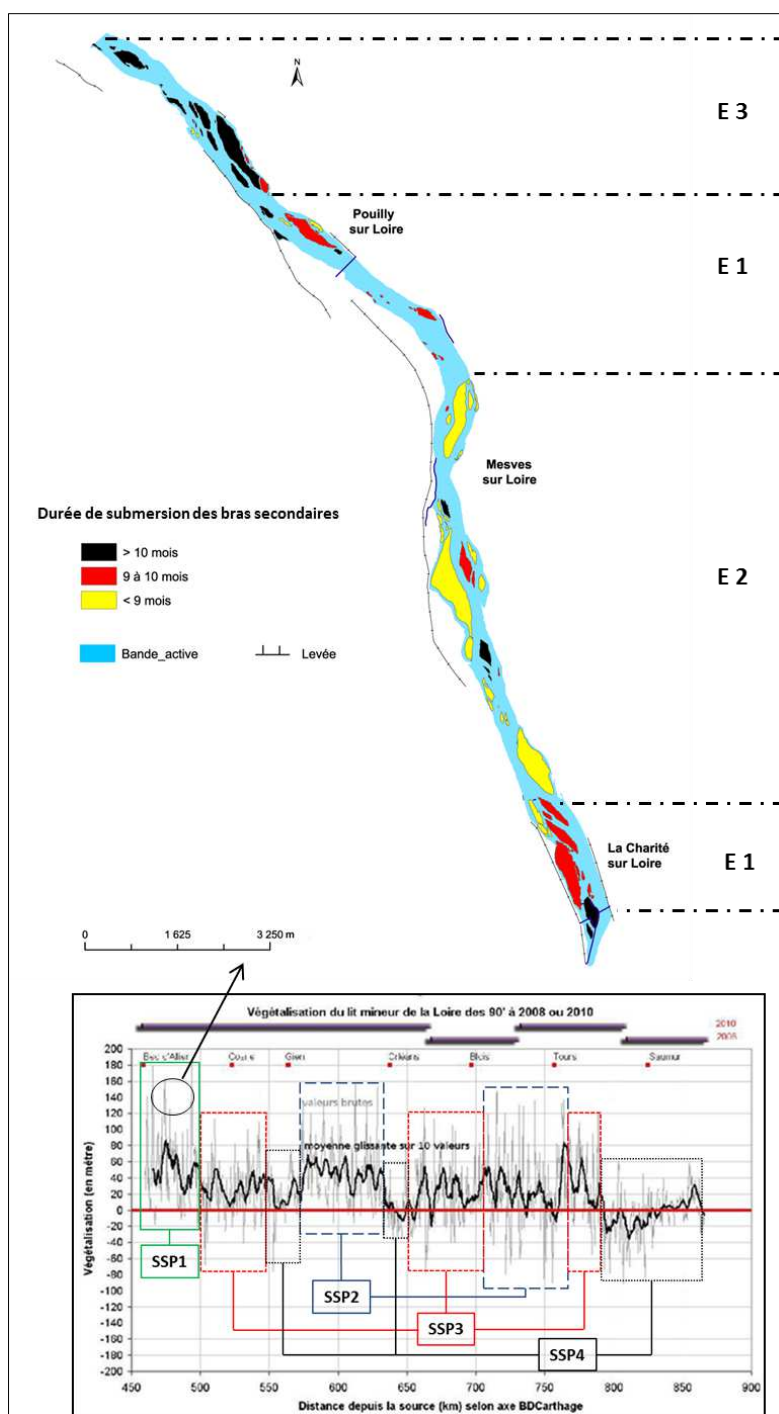


Figure 198. Exemple de segmentation d'un tronçon du sous-secteur prioritaire n°1 en trois ensembles hydrologiques homogènes.

L'indicateur utilisé sont les durées de submersion des bras secondaires (source des données : Braud et latapie, 2012 ; Grivel, 2008, adaptées).

La durée de submersion des bras secondaires est un indicateur qui permet d'avoir une idée préalable sur le rythme d'extension spatiale de la végétation et de l'efficacité des travaux de dévégétalisation (adapter la fréquence des interventions). Nous disposant sur la Loire

de données topographiques des bras secondaires (LIDAR) et des hauteurs d'eau en fonction des débits. Ces données peuvent être utilisées pour calculer les durées de submersions des bras secondaires à l'échelle de la Loire moyenne et d'établir une sectorisation des ensembles présentant des caractéristiques hydrologiques homogènes.

b. Les indicateurs à grande échelle (unités fonctionnelles)

Après avoir effectué une classification des secteurs fonctionnels (à moyenne échelle), nous procédant à une analyse à l'échelle des bras secondaires (unités fonctionnelles). Cette approche à grande échelle spatiale nous semble indispensable car elle correspond à l'échelle des travaux de restauration. Il s'agit de déterminer dans un premier temps les caractéristiques hydrologiques et granulométriques de ces annexes d'écoulements et calculer par la suite les contraintes tractrices. L'objectif est d'obtenir des informations relatives à la capacité de transport solides au sein des bras. Cela permet de déduire la réponse hydro-sédimentaire des secteurs concernés par les travaux de restaurations et par conséquent, améliorer l'efficacité de ces interventions. Nous prenons comme exemple les sites ateliers de La Charité-sur-Loire et de Mesves.

L'activité hydrologique des bras secondaires (relation hauteur - débit)

Disposons de données topographiques et de données relatives à la hauteur de la ligne d'eau (relevées sur le terrain), nous avons pu définir les débits de connexions des bras secondaires et calculer les hauteurs d'eau en fonction de la variation des débits. Cette analyse concerne les deux bras ayant fait l'objet de travaux de restauration dans le site de La Charité-sur-Loire (chenaux A, E,) et le bras secondaire du site de Mesves.

Les seuils hydrologiques de connexions de ces bras sont différents. Pour le site de la Charité-sur-Loire, on note respectivement $280 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $360 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour les bras (A) et (E). La submersion totale du bras (A) se fait à partir d'un débit d'environ $480 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le seuil de submersion totale du bras (E) est proche de $430 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui fait des durées de submersion annuelles respectives de et jours. Le tirant d'eau (calculé à partir de la ligne du talweg) correspondant au débit de pleins bords est d'une hauteur moyenne de 1,8 m dans le bras (A) et de 1,7 m dans le bras (E).

Le seuil de connexion hydrologique du bras secondaire (M) du site atelier de Mesves est plus élevé, soit environ $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ce dernier est complètement submergé à partir d'un débit avoisinant $1200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ce qui fait une durée de submersion annuelle de jours. Le tirant correspondant au débit pleins bord est d'une hauteur moyenne d'environ 80 cm dans ce bras.

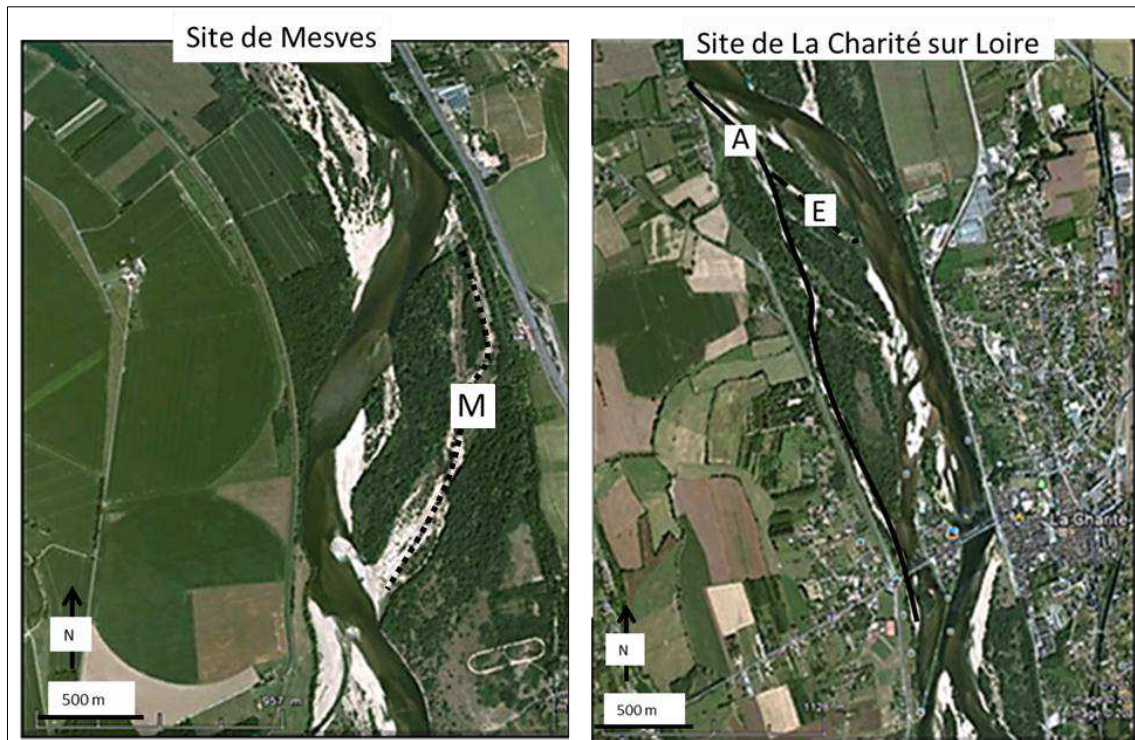


Figure 199. Localisation des bras secondaires (A) et (E), site de La Charité-sur-Loire et (M), site de Mesves.

Ces résultats mettent en évidence une variation de l'activité hydrologique des bras secondaires et fournissent des informations relatives à la compétence de ces derniers. La durée de submersion des bras influence la capacité de transport solide et limite le développement de la végétation. Les bras présentant une faible activité hydrologique sont susceptibles de stocker la charge solide (phénomène favorisé par la présence de la végétation). Si les conditions hydrologiques ne permettent pas la remobilisation de sédiments, il nous semble nécessaire d'envisager dans le cas d'une intervention de dévégétalisation une remobilisation mécanique des sédiments. Cela afin d'augmenter le différentiel de la pente (entre l'amont et l'aval dans les chenaux restaurés) et de favoriser la remobilisation des sédiments.

Au regard des conditions hydrologiques pris en compte dans le cadre de ce travail (2007 – 2011), on remarque que le bras secondaire de Mesves présente une activité hydrologique moindre. Ce dernier se situe dans un sous secteur caractérisé par une extension rapide de la végétation. Les bouchons alluviaux sont donc susceptibles de se former dans ce bras. Les résultats de l'analyse topographique réalisée dans ce secteur attestent cette tendance à l'exhaussement (voir chapitre 5).

La fréquence et le type d'intervention de restauration doivent être adaptés au mode de fonctionnement hydro-sédimentaire des bras secondaires. La remobilisation mécanique des sédiments dans les bras à faible activité hydrologique peut favoriser le transfert de la charge solide de ces bras vers la Loire.

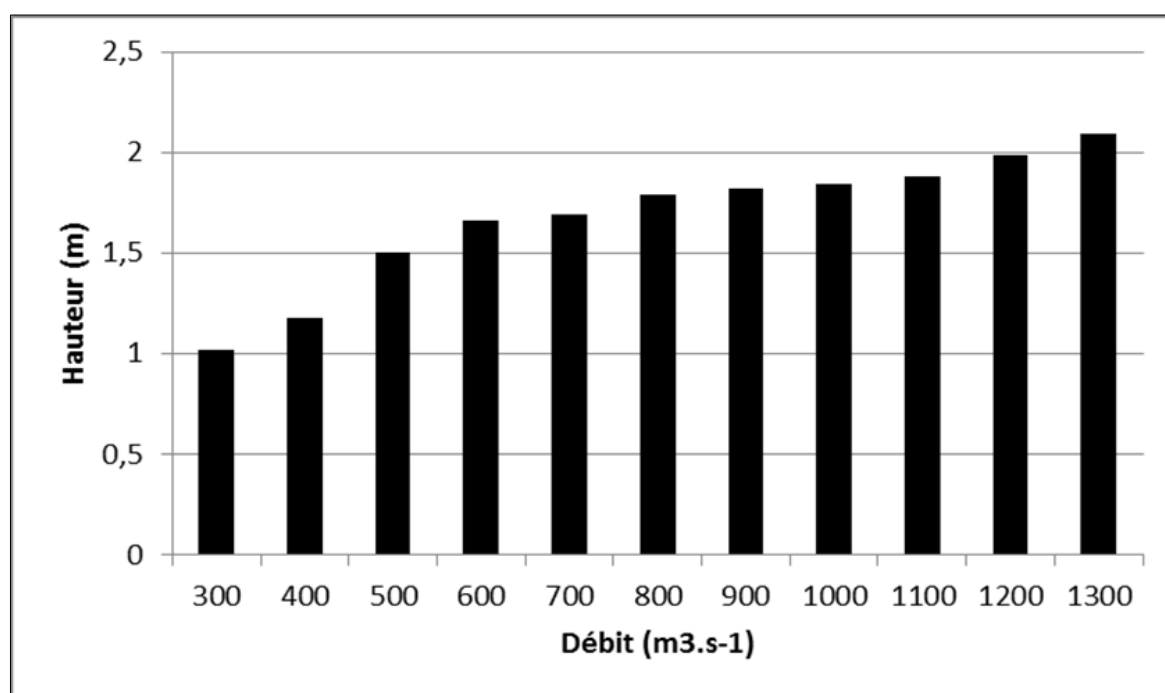


Figure 200. Variation de la Hauteur d'eau en fonction des débits, exemple du bras secondaire (A), site de La Charité-sur-Loire.

Le calcul de la contrainte de cisaillement (la capacité de transport solide)

Cette analyse concerne les secteurs retenus pour faire l'objet de travaux d'entretien. L'objectif est d'évaluer l'efficacité de ces travaux avant leur réalisation. Il s'agit de déterminer dans un premier temps la classe granulométrique du stock sédimentaire, en suite de calculer la contrainte tractrice en utilisant le paramètre de Shields (le rayon hydraulique est déjà calculer dans la phase d'analyse de la relation « hauteur – débit »).

Cela à fin de déduire le débit du début d'entraînement des grains. Une fois ce dernier définit on le compare avec les débits réellement mesurés dans le secteur étudié. En utilisant cette méthode on peut savoir si les conditions hydrologiques permettent ou pas la remobilisation des sédiments (après dévégétalisation).

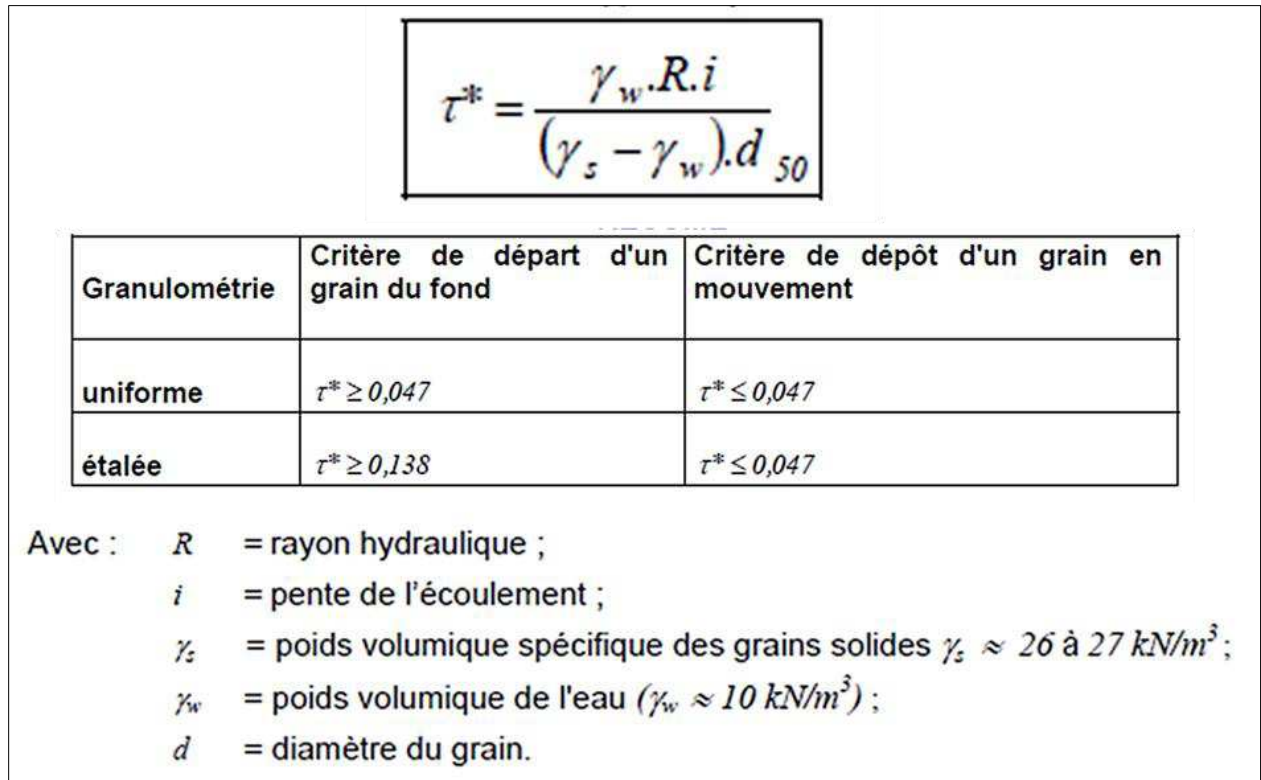


Figure 201. Calcul de la contrainte tractrice en utilisant le Paramètre de Shields et la classification de Ramette (selon Parker, 1982).

Nous avons appliqué cette méthode sur site atelier de la Charité-sur-Loire au niveau de la connexion aval du bras secondaire (A), ce secteur à fait l'objet de travaux de restauration en 2006, il fait également partie des zones concernée par les travaux de dévégétalisation commencés en 2010 dans ce site atelier.

Les résultats obtenus nous ont permis de déduire le débit seuil permettant le début d'entraînement des grains pour les différentes classe granulométriques du stock sédimentaire. Ce débit varie donc en fonction du diamètre des sédiments accumulés dans ce secteur. On constate d'après les résultats du tableau que le débit de mise en mouvement des sédiments varie entre $280 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (débit de connexion du bras) et $1300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (crue annuelle). Les sédiments mis en mouvement à partir d'un débit de 280 concerne % de la surface du secteur étudié, à $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, la mise en mouvement des grains concerne % à

partir de $1300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, la mise en mouvement des grains concerne tout le secteur étudié. Le croisement de ces résultats avec ceux de l'analyse des conditions hydrologiques concernant la période d'étude 2008 - 2011 (débits moyens journaliers) met en évidence les résultats suivants :

- A partir d'un débit de $280 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$: mise en mouvement des sédiments de diamètres de la médiane variant entre 0,00062 et 0,0017 m pendant 96 jours en 2008, 100 jours en 2009, 173 jours en 2010 et 65 jours en 2011.
- A partir d'un débit de $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$: mise en mouvement des sédiments de diamètres de la médiane est de 0,0039 m pendant 108 jours en 2008, 24 jours en 2009, 66 jours en 2010 et 23 jours en 2011.
- A partir d'un débit de $1300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$: mise en mouvement des sédiments de diamètres médian de 0,0062 m pendant 3 jours en 2008, 0 jours en 2009, 5 jours en 2010 et 0 jours en 2011.

On constate une alternance d'année à forte et à faible activité hydrologique. Les conditions hydrologiques de l'année 2011 sont les plus faibles de la période étudiée (2008 – 2011). La mise en mouvement est possible pour les sédiments dont le diamètre (D50) varie entre 0,00062 et 0,0039 m sur toute la période d'étude. La charge solide caractérisée par une médiane d'une valeur de 0,0062 m est mise en mouvement en moyenne 4 jours en 2008 et 2010 seulement. Les travaux de dévégétalisation sont susceptible de favoriser le transport de la charge solide dans ce secteur et d'améliorer les conditions d'écoulement.

Tableau 27. Détermination du débit d'entraînement des grains à partir du de Shields et la classification de Ramette.

D_{50} (m)	R (m)	Débit du début d'entrainement des grains ($m^3 s^{-1}$)
0,0039	1,5	500
0,0017	0,67	280
0,0012	0,47	280
0,0062	2,47	1300
0,0015	0,59	250
0,0019	0,75	300
0,00062	0,24	280
0,0039	1,5	500

D : diamètre médian des grains. R : rayon hydraulique.

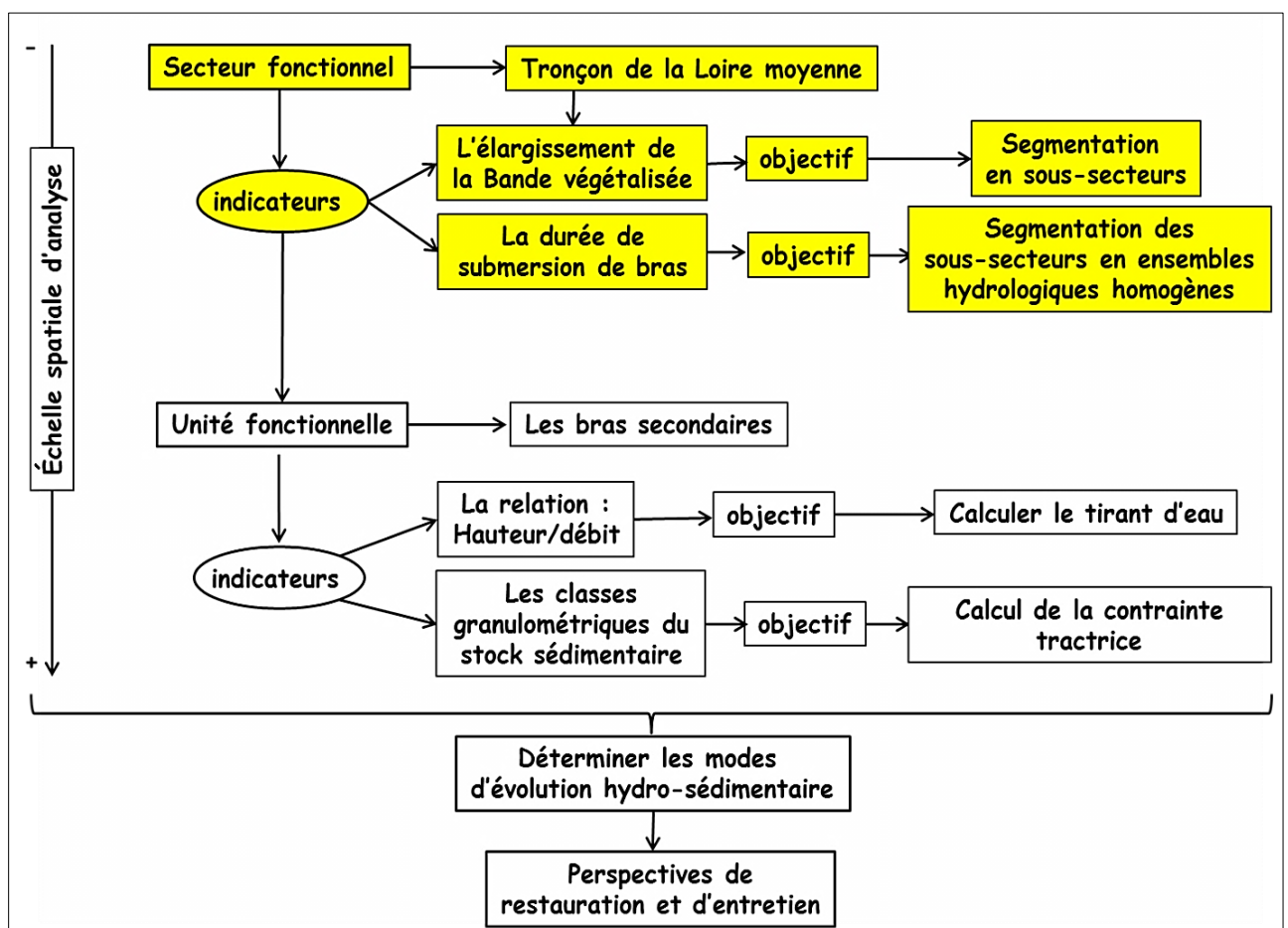


Figure 202. Synthèse du protocole d'analyse pour optimiser les travaux de restauration, ce protocole peut être appliqué à l'échelle du fleuve.

c. Perspectives de restauration

c.1 Site atelier de La Charité-sur-Loire

Dans le but de favoriser l'écoulement dans le chenal il est recommandé d'intervenir au niveau des points suivants :

- préserver la partie de la chevrette collée à la berge en rive gauche pour éviter la formation de niches d'érosion;
- Protéger la berge de la rive gauche au droit de la brèche (fixation des enrochements, génie végétal);
- abaisser une partie à l'extrémité de la chevrette afin d'augmenter le débit dans les bras secondaire (A, B) et de diriger les eaux vers l'aval du bras. Cela permet de dévier le courant qui érode la berge au droit de la brèche;
- au niveau des piles du pont, évacuation des encombres (végétation et embâcles) pour faciliter le passage du flux liquide;
- ouverture du chenal latéral (végétalisé) en rive gauche partie aval, pour éviter la connexion des îles;
- suppression de la végétation au niveau des chenaux C, D et E
- ouverture du chenal au niveau du faubourg;
- élimination de la végétation et remobilisation des sédiments au niveau de la partie amont (galet) et au niveau de la partie aval (formation de banc de sable). Cela permettra d'augmenter la pente, et assurera une bonne connexion aval avec la Loire;
- au niveau du bras secondaire situé en amont du pont de la Charité en rive droite, il est souhaitable d'intervenir sur le petit chenal qui débouche sur l'atterrissement sableux de la rive droite, afin de dévier les eaux vers cette rive et favoriser la remobilisation des sédiments;
- prendre en compte lors de la réalisation de travaux de la présence de stations de Jussie, Pulicaire vulgaire et de périmètre de protection pour castors.

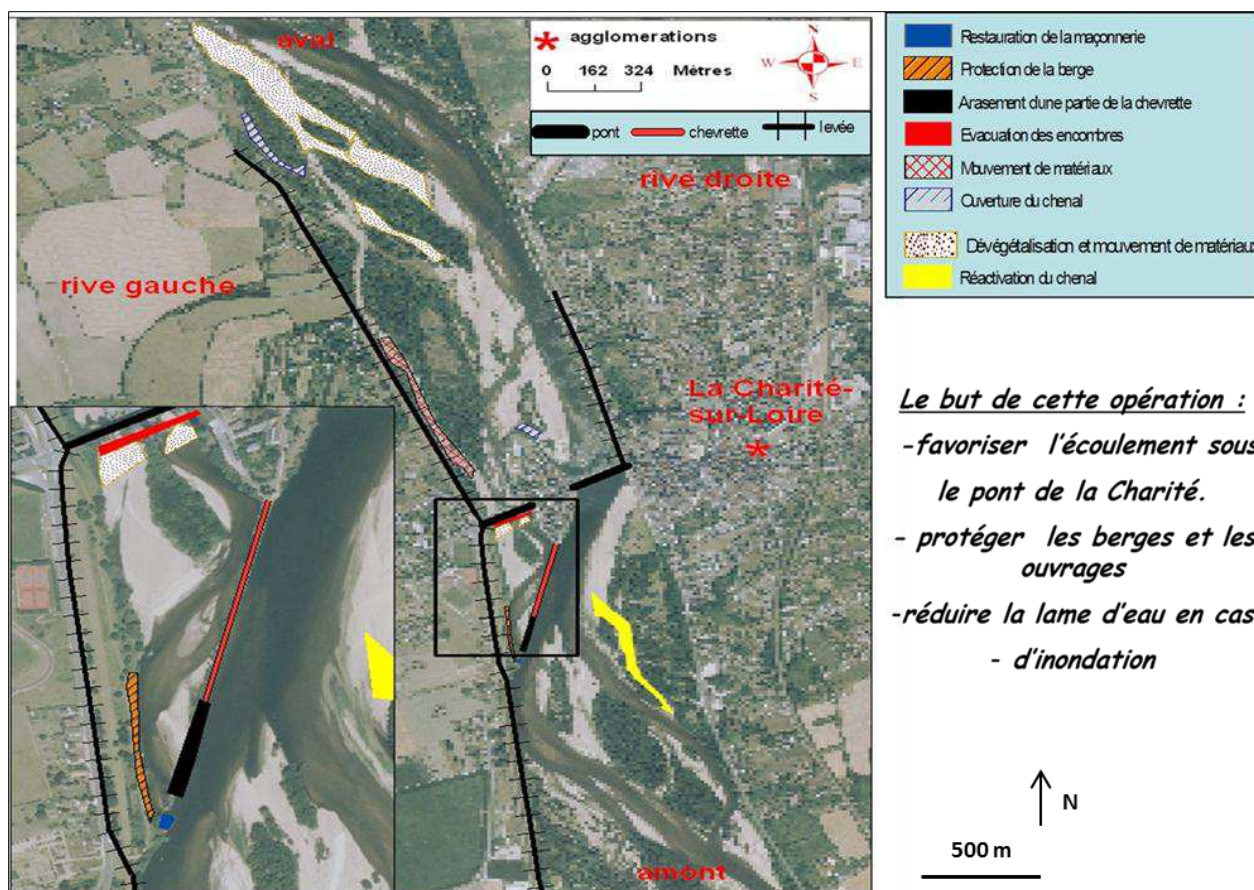


Figure 203. Perspective de restauration du site atelier de La Charité-sur-Loire.

c.2 Site atelier de Mesves

Les travaux d'entretien et de restauration concernent les secteurs suivants :

- Le bras secondaire en rive droite : suppression de la végétation pionnière essentiellement au niveau de la connexion aval et remobilisation de sédiments pour augmenter le différentiel de pente au niveau de la sortie du bras;
- suppression de la végétation au niveau du petit chenal séparant l'île de Barreaux avec la petite île située sur la marge latérale du bras principal, cela pour éviter le rattachement de cette île à l'île des Barreaux;
- dévégétalisation du banc situé en rive gauche (au niveau de la partie aval du site d'étude) pour favoriser l'érosion de cet atterrissement et l'élargissement du chenal principal;
- protection de la levée au niveau des zones fragilisées par d'érosion (les secteurs les plus profonds se situent au niveau de la levée).



Figure 204. Perspective de restauration du site atelier de Mesves

c.3 Site atelier de Guilly

Les actions d'entretien et de restauration proposées dans ce secteur sont :

- la suppression de la végétation pionnière au niveau des extrémités amont et aval des îles afin de limiter leur extension latérale;
- la suppression de la végétation dans bancs situé au niveau de l'île des Maïs, et au niveau de l'île de Saint Benoit. Cela afin de favoriser le transit sédimentaire (ce secteur se caractérise par une accumulation de sédiments)
- protection de la levée au niveau des berges concaves (le rythme d'incision du lit le plus élevé est enregistré dans ces zones);

- à titre expérimental, l'extraction de l'enrochement situé dans le lit au niveau de la berge concave au lieudit «Bouteille », cette opération doit être suivie par une étude de l'évolution du fond du lit pour déterminer l'impact de la suppression de ce seuil dur sur l'évolution du plancher alluvial et particulièrement sur l'évolution de la mouille située au niveau de la berge concave.

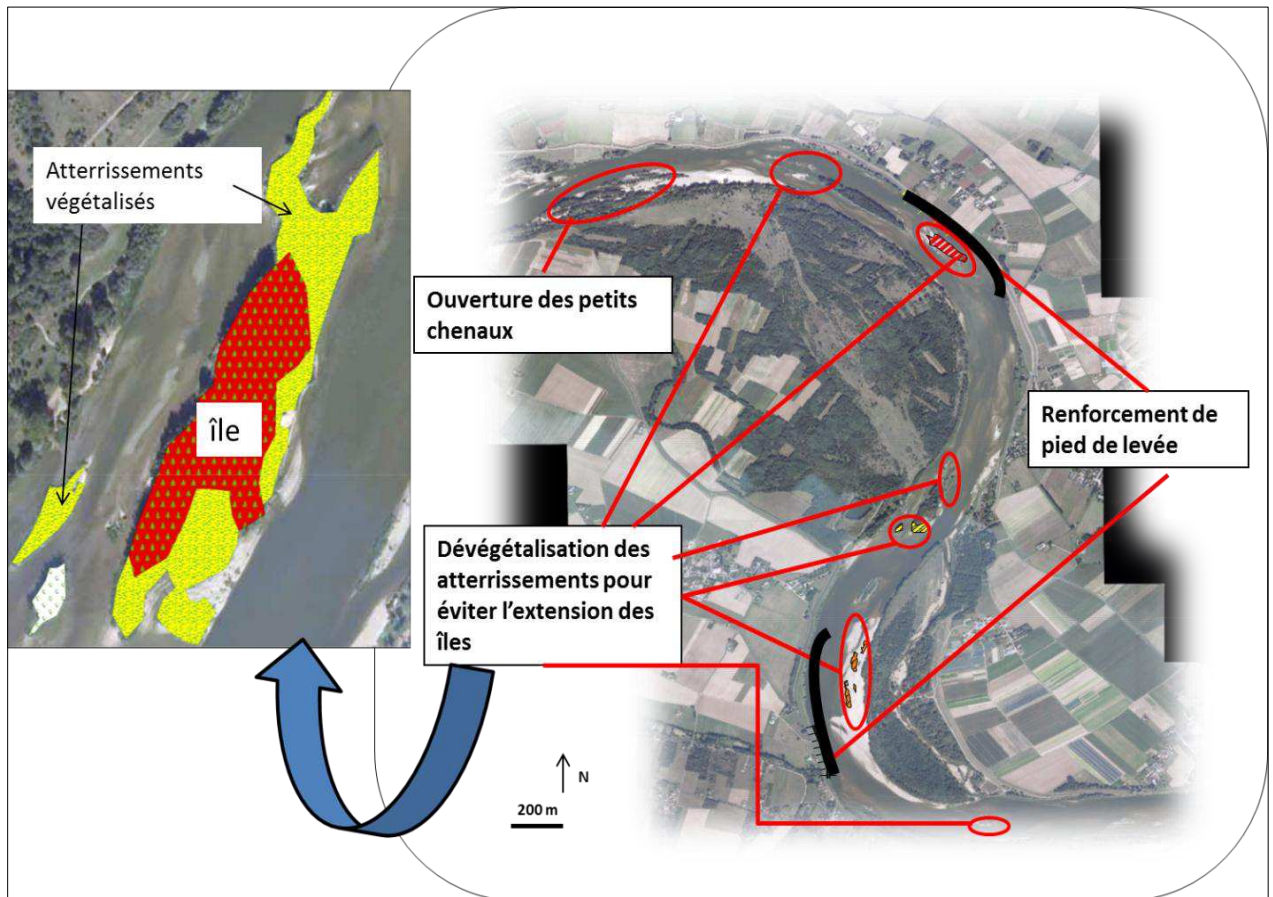


Figure 205. Perspective de restauration du site atelier de Mesves

Conclusion

Le paysage fluvial de la Loire est constitué d'une mosaïque hétérogène regroupant des mésoformes (île, bras, banc ...), des groupements végétaux et des aménagements. L'évolution de ces éléments et leurs emprises spatiales influence la dynamique fluviale en agissant sur les processus d'ajustement du cours d'eau (variables de contrôle) et par voie de conséquence sur le style fluvial. Le lit de la Loire adapte ses formes en fonction de l'interaction entre ces éléments et leurs évolutions dans l'espace et le temps. De ce fait, l'analyse du fonctionnement de ce système fluvial est très complexe. Elle doit associer une dynamique fluviale, végétale et sociale.

La seconde difficulté réside dans le caractère local de ce cours d'eau, l'analyse d'un tronçon du fleuve est conditionnée par des circonstances locales. Cela fait appel à l'utilisation d'outils et de méthodes expérimentaux adaptés aux sites étudiés. L'ajustement contemporain des formes du lit de la Loire est une réponse à une interaction complexe de facteurs anthropique et naturel favorisant le développement de la végétation au détriment de la bande active. Cependant, à la différence de la plupart des cours d'eau de l'Europe, la Loire a conservé une certaine biodiversité (paysage riverain sauvage et pionnier) qui mérite d'être préservé.

L'entretien des cours doit être motivé par des objectifs précis permettant d'établir un plan de gestion détaillé (Piégay *et al.*, 2003). Cette démarche rigoureuse précédant la réalisation des travaux permet d'optimiser et d'améliorer les résultats.

L'intervention au sein du lit doit prendre en compte les facteurs suivants :

- L'anthropisation : la présence d'aménagements (pont, chevette) peut modifier considérablement la direction et la force des écoulements, ce qui favorise l'érosion des berges et le comblement des bras secondaires. On prend à titre d'exemple le site de La Charité-sur-Loire ou Fourchambault, ces secteurs sont fortement anthropisés avec des protections de berges, pont et chevette. Ces aménagements favorisent le resserrement de la section mouillée et le ralentissement des écoulements (dans certains endroits), ce qui conduit à la formation de bouchons au sein des bras secondaires et l'érosion des berges. Les chevrettes fonctionnent comme des barrages à débit moyen favorisant la création de bras

mort artificiel à leur aval et la formation d'îles (La chevrette de Givry par exemple, elle se comporte comme une protection de la berge de l'île situé à son aval).

- l'évolution des chenaux secondaires, couvrant plusieurs paramètres d'ordres physiques sont à prendre en compte : la configuration et les dimensions des chenaux, leur position par rapport au bras principal (exhaussement), la pente et la présence de la végétation. Nous avons remarqué (lors de l'analyse sur terrain) que les bras dont la connexion amont correspond à la partie concave du chenal principal sont plus actifs que ceux dont la connexion correspond à la partie convexe du bras principal. Cela peut être expliqué par la réduction de la force des courants (comme dans le deuxième cas).

- la typologie et le rythme d'évolution des îles, ces formes insulaires ont connu une multiplication et une forte végétalisation depuis une cinquantaine d'années. Les interventions de restauration doivent limiter l'extension et le raccordement de ces îles aux berges.

- les durées de submersion des bras secondaire pour adapter la fréquence des interventions

- la compétence dans les bras secondaire pour évaluer l'efficacité des travaux

Du point de vue gestion des travaux il serait peut être bénéfique d'établir à partir des éléments précédemment présentés un programme permettant la planification spatiale et temporelle des zones d'interventions et qui agit par ordre de priorité (secteur à enjeux majeur) tout en tenant compte les budgets destinées à ces opérations.

Conclusion générale

La Loire, plus long hydrosystème fluvial de France, avec un bassin hydrographique représentant un cinquième du territoire métropolitain, est encore présentée comme le "dernier fleuve sauvage d'Europe". Ce cours d'eau a conservé des qualités hydrologiques originales malgré la présence de grands barrages, avec chaque année une longue période de basses eaux (printemps-été) et de hautes eaux hivernales. Pourtant, la Loire, tout particulièrement dans son cours moyen, présente les caractères d'un fleuve en cours d'ajustement à une crise environnementale majeure dans son histoire. La végétalisation active du lit, l'incision du plancher alluvial et la diminution de la bande active sont les signes biomorphologiques des perturbations subies par le fleuve. En effet, les ouvrages de canalisation généralisés au cours du 19^e siècle (grandes digues, duits, chevrettes) et les extractions des sédiments dans le lit mineur, de 1950 à 1994, ont gravement contraint la dynamique fluviale et modifié les conditions de transport des flux d'eau et de sédiments. Les Levées, duits et chevrettes imprègnent fortement les paysages fluviaux de la vallée de la Loire, par leur omniprésence et leur intégration aux structures des villes ligériennes (anciennes cités portuaires). Ces ouvrages opérationnels, au temps de la navigation ligérienne, sont aujourd'hui obsolètes mais perturbent toujours la dynamique fluviale : impacts sur la rétention sédimentaire, influence des conditions d'écoulements, végétalisation du lit entre levées. Ces objets fluviaux ont ainsi contribué au réajustement fluvial toujours en cours. Le paysage fluvial du lit entre levées s'est profondément modifié depuis l'arrêt de la navigation et des modes d'entretien à la fin du XIX^{ème} siècle. Evoluent en parallèle, la morphologie du lit entre levées, les paysages fluviaux et le maintien des ouvrages de navigation. A cette trajectoire paysagère, des conflits naissent et des enjeux apparaissent : entretenir et restaurer le lit fluvial, maintenir ou supprimer des aménagements fluviaux, valoriser le patrimoine de navigation. Le phénomène de patrimonialisation accentue les tensions. Le processus de patrimonialisation, par essence, incite à la fixation des ouvrages hérités de la navigation et contrarie certains objectifs de la

Trame bleue (favoriser les continuités écologique et hydrosédimentaire des cours d'eau) et de la Directive Cadre sur l'Eau (retour à un bon état des hydrosystèmes continentaux).

Le lit fluvial réagit à ces formes d'aménagements lourds par érosion de son fonds (incision), migration latérale du thalweg, rétraction de la largeur du corridor fluvial, développement des îles et de nombreuses anomalies géomorphologiques (présence d'îles boisées dans des méandres). Nous nous intéresserons dans le cadre de ce travail au rôle actuel des aménagements fluviaux sur la dynamique et la morphologie du fleuve. Nous avons évalué les impacts directs de l'industrie du granulat, développée dès la fin de la seconde guerre mondiale pour reconstruire le pays et largement généralisée dans les années 1960 et 1970 pour la politique énergétique française (construction des centrales nucléaires le long de la Loire). Pour exposer ces deux thématiques liées aux problématiques environnementales contemporaines du fleuve, nous mettrons en avant la méthodologie et les outils déployés à différentes échelles spatio-temporelles : analyse spatiale à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) des données hydrologiques (lignes d'eau et évolution des débits) et géomorphologiques (profils topographiques, évolution des formes en plan sous un SIG) de la Loire moyenne; implémentation de données bathymétriques (par échosondeur) et topographiques (DGPS et théodolite) à échelle fine en construisant des Modèles Numériques de Terrain (calcul des volumes érodés et sédimentés entre plusieurs dates). Cette méthode permet d'expertiser et localiser précisément dans le lit fluvial les impacts engendrés par les aménagements sur l'ensemble du cours de la Loire moyenne et à l'échelle de sites de référence.

Au final, l'expertise en évaluation environnementale peut apporter des clés essentielles et pertinentes aux gestionnaires chargés de l'entretien et de la restauration des cours d'eau.

Bibliographie

- Abam T.K.S., 1997.** Genesis of channel bank overhangs in the Niger analysis of mechanisms of failure. *Geomorphology*, 18 : 151–169.
- Agences de l'eau, 1999.** La gestion intégrée des rivières. Guide collectif et pluridisciplinaire, 3 vol.
- Amoros C., Petts G.E., 1993.** Hydrosystèmes fluviaux. Masson (coll. d'Ecologie), 300 p.
- Amoros C., A.L. Roux, J.L. Reygrobellet, J.P. Bravard et G. Pautou, 1987.** A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. *Regulated Rivers*, 1 : 17-36.
- Andriamahefa H., 1999.** Les hydro-écorégions du bassin de la Loire. Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les cours d'eau et les basins versants. Université J. Monnet, St Etienne, 272 p.
- Anselin A., 1998.** Influence de la dynamique fluviale sur la dynamique des communautés végétales dans le Val de Loire - Mise en place d'un protocole d'étude phytoécologique. INA. PG, stage CAE, Université de Bourgogne.
- Arnaud-Fassetta G. 1998.** Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône. Thèse, Université d'Aix-Marseille 1, Presses Universitaires de Septentrion, Lille, 329 p.
- Babonaux Y., 1970.** Le lit de la Loire - Etude d'hydrodynamique fluviale. Paris, Bibliothèque Nationale, 2 vol.
- Bacchi M. et Berton J.-P., 1997.** Guide méthodologique d'entretien du lit de la Loire. DIREN Centre - ADESVV, Chinon, 95 p.
- Baldeck M., 2006.** Impact de la faune sauvage sur la forêt alluviale. Mémoire de 2^{ème} année de master de Géographie, Université Paris 8.
- Bazin P. et Gautier E., 1996.** Un espace de liberté pour la Loire et l'Allier : de la détermination géomorphologique à la gestion. *Revue de Géographie de Lyon*, 71/4 : 377-386.
- Beaudoin F., 1989.** La marine de Loire et son chaland. *Les cahiers du musée de la batellerie*, 12, 39 p.
- Beck T. et Corbonnois J., 2003.** Les différents états du lit mineur de la Moselle entre Epinal et Méréville, étapes de la reconstruction d'un nouvel équilibre. *Actes du colloque le fil de l'eau*, Nancy, 10-12 mars 2003.
- Beck T. et Corbonnois J., 2004.** Conditions du transit de la charge solide grossière dans le lit de la Moselle amont - Protocole de mesures et détermination des processus. *Actes du colloque Spatialisation et cartographie en hydrologie, Mosella*, XXIX/3-4 : 341-352.
- Berthois L., 1972.** Les transports sédimentaires et l'érosion dans le bassin de la Loire. *Etudes Ligériennes*, 11 : 50-69.
- Billacois F., 1964.** La batellerie de la Loire au XVII^{ème} siècle. *Revue d'Histoire moderne et contemporaine* : 163-190.
- Billacois F., 2002.** L'île de Cosne : évolution et aménagement (XVII^{ème}-XX^{ème} siècles), *Études ligériennes*, colloque *Approche archéologique de l'environnement et de l'aménagement du territoire ligérien*, Orléans, 14-16 novembre 2002 : 263-267.
- Binard R., 2003.** Caractérisation de l'habitat de trois espèces d'oiseaux des grèves de la Loire. Mémoire de DESS, 41 p. + Annexes.
- BIOTOPE, 2004.** Documents d'Objectifs de la proposition de Site d'Intérêt Communautaire FR2400522 « Vallées de la Loire et de l'Allier ». 148 p.

- BIOTOPE, 2005.** Etude d'incidence des travaux de restauration du lit de la Loire, NATURA 2000, Départements de la Saone-et-Loire (71), de la Nièvre (58) et du Cher (18), 61 p.
- Boissel A., 1997.** Historique des activités humaines sur la Réserve Naturelle du Val de Loire. Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons, 29 p. + carte
- Bomer B., 1972.** Les îles de la Loire, évolution ou stabilité ? *Etudes Ligériennes*, 11 : 70-80.
- Bouchardy, C., 2002.** La Loire. Vallées et vals du grand fleuve sauvage. La Bibliothèque du naturaliste. Delachaux et Niestlé, Paris, 290 p.
- Bouquet, C., 2000.** La communauté urbaine de Tours et la Loire à la fin du Moyen Age. Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges. Synthèse des résultats du PCR 1996-1999 : 37- 46.
- Bourreau L., 2000.** Restauration du lit de la Loire au droit de la chevette de la Charité-sur-Loire. 50 p.
- Braque R. et Loiseau J.-E., 1980.** Les forêts alluviales intéressantes du cours moyen méridien de la Loire et de l'Allier. *Colloques phytosociologiques*, IX, Strasbourg : 601-605.
- Bravard J.-P., 1980.** Le Rhône du Léman à Lyon. La Manufacture (Coll. L'homme et la Nature), 452 p.
- Bravard J.-P., Amoros C., Pautou G., Bornette G., Bournaud M., Creuze des Chatelliers M., Gibert J., Peiry J.-L., Perrin J.-F., Tachet H. 1997.** River incision in Southeastern France : morphological phenomena and ecological impacts. *Regulated Rivers, Research and Management*, 13: 75-90.
- Bravard J.-P. et Magny M., 2002 (éd.).** Les Fleuves ont une histoire. Les paléoenvironnements des rivières et des lacs français depuis 15 000 ans. Paris, Errance, coll. Archéologie aujourd'hui, 312 p.
- Bravard J.P., Landon N., Peiry J.L. et Piégay H., 1999.** Principles of engineering geomorphology for managing channel erosion and bedload transport, examples from French rivers. *Geomorphology*, 31: 291-311.
- Bravard J.P. et Petit F., 1997.** Les cours d'eau - dynamique du système fluvial. Colin, 222p.
- Brice J.C., 1984.** Planform properties of meandering rivers, *in* Elliot, Proceeding of the Conference – Rivers '83, American Society of Civil Engineers, New-Orleans, Canada : 1-15.
- Brossé R., 1982.** Les processus sédimentaires dans le fleuve Loire. Université d'Angers, Angers, 350 p.
- Bugnon F., Pages J., Clavier J.-L., Loiseau J.-E. et Ducerf G., 1983.** Etude et cartographie des biocénoses dans la vallée de la Loire nivernaise en aval de Decize. GREMINAT, Univ. de Dijon, 70 p.
- Burnouf J., Carcaud N., 1999.** Le Val de Loire en Anjou Touraine : un cours forcé par les sociétés riveraines. *Médiévales*, 36 : 17-29.
- Burnouf J., Leveau Ph., 2004.** Présentation. *In* Burnouf J., Leveau Ph. (Eds), Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture. CTHS (Archéologie et histoire de l'art, 19) : 9-14.
- Burnouf J., Muxart T., Villalba B., Vivien F.-D., 2003.** Le passé a de l'avenir : premier bilan de l'appel d'offre «Histoire des interactions sociétés-milieus» et perspectives de

recherches. In Muxart T., Vivien F.-D., Villalba B., Burnouf J. (Eds.), *Des milieux et des hommes : fragments d'histoires croisées*. Elsevier : 15-28.

Calard R., Karlsson P., 1994. L'effet de travaux d'entretien du lit sur l'écoulement des crues : mise au point d'une méthodologie et application au projet de nettoyage du lit de la Loire entre La Charité-sur-Loire et Saint-Satur, 25 p. + Cartes + Ann.

Carcaud N., 2004. D'espace et de temps : un itinéraire de recherche et d'enseignement sur les anthroposystèmes fluviaux. Mémoire de thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université d'Angers, 216 p.

Carcaud, N., Cyprien, A.-L. et Visset, L., 2000. Marais et vallée de la Loire, mémoire des paysages depuis dix mille ans : étude comparative des marais de Distré et Champtocé et de la vallée de la Loire à Montjean-sur-Loire. *Archives d'Anjou*, 4 : 187-215.

Carcaud N., Garcin M., Visset L., Musch J., Burnouf J., 2002, Nouvelle lecture de l'évolution des paysages fluviaux à l'Holocène dans le bassin de la Loire moyenne. In Bravard J.P., Magny M., (eds) *Les fleuves ont une histoire – Paléoenvironnements des rivières et des lacs français depuis 15000 ans*, Errance: 71-84.

Carson M.A., 1984. The meandering-braided river threshold : a reappraisal. *Journal of Hydrology*, 73: 315-334.

Chambaud F., Lemaire E. & Oberti D., 1996. Opération Locale Val de Loire Val d'Allier. Suivi écologique et évaluation des Mesures Agri-Environnementales. Pré-étude écologique et typologie fonctionnelle des prairies, landes et pelouses inondables. Rapport Cellule d'Application en Écologie, Université de Bourgogne pour le compte de la Chambre d'Agriculture de la Nièvre et de la DIREN Bourgogne : 100 p. + annexes.

Champion M., 1863. Les inondations en France depuis le VI^{ème} siècle jusqu'à nos jours, Recherches et documents, Paris, 6 vol.

Chorley R.J. et Kennedy B.A., 1971. Physical geography, a systems approach. Prentice Hall, London, 370 p.

Collectif, 2006. Recueil d'expériences du programme Loire Nature 2002-2006. Fédération des Conservatoires d'espaces naturels régionaux en collaboration avec la LPO et le WWF, 212 p.

Comoy G., 1861. Renseignements sur les crues de la Loire et de ses grands affluents, Paris, in-4°, 32p.

Comoy G., 1868. Mémoires sur les ouvrages de défense contre les inondations, Archives de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons, 1996. Diagnostic écologique de la Réserve Naturelle du Val de Loire. 50 p. + Cartes + Ann. (CSNB, 1996).

Coque R., 1993. Géomorphologie. Paris, Armand Collin.

Corillion R., 1982-1983. Flore et végétation de la vallée de la Loire (cours occidental : de l'Orléanais à l'estuaire). Jouve, Paris - Texte : 736 p., Illustrations : 355 p.

Cornier T., 1996. Etude de la dynamique de la végétation de la plaine alluviale de la Loire. Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature Orléans et IMACOF C.U. Chinon - 3 rapports.

Cornier, T. 1999. La biodiversité dans l'hydrosystème ligérien étudiée à partir de la végétation alluviale. *J. Bot. Soc. bot. France.*, 12: 45-50.

- Cornier T., 2002.** La végétation alluviale de la Loire entre le Charolais et l'Anjou : essai de modélisation de l'hydrosystème. Thèse Doctorat ès Sciences, Université de Tours.
- Cosandey C. et Robinson M., 2000.** Hydrologie continentale, Colin, 360 p.
- Cosandey C., 2004.** Les eaux courantes, Belin, 240 p.
- Couderchet L., 2000.** Mise au point, par télédétection spatiale et SIG, d'une méthode d'inventaire normalisé des milieux naturels selon CORINE Biotopes. *Photo-interprétation*, n°1999/3-4, éditions ESKA, Paris.
- Courtet L., Pateaud P. et Stephan B., 1990.** La Loire en sursis. Ed. La Manufacture, 305 p.
- Crutzen, P. J. et Stoermer E. F., 2000.** L'"Anthropocene". *Bulletin Global De Changement*, 41 : 12-13.
- Cyprien A.-L., 2001.** Chronologie de l'Interaction de l'homme et du milieu dans l'espace central et aval de la Loire. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2 tomes.
- Cyprien A.-L., Carcaud N., Visset L., 2001.** Etude paléoenvironnementale du marais de Distré (Maine-et-Loire) : géoarchéologie d'une zone humide depuis le Préboréal. *Quaternaire*, 12/ 1-2 : 89-101.
- Dacharry M., 1974.** Hydrologie de la Loire en amont de Gien, Paris, N.A.L., 2 vol., 619 p.
- Dacharry M., 1969.** Quelques remarques sur les parts respectives de la Loire et de l'Allier dans les débits de crues à Gien de 1955 à 1967. *Bulletin de la Section de Géographie*, Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris, tome LXXX : 383-396.
- Dacharry M., 1996.** Les grandes crues historiques de la Loire, *La Houille blanche* 6-7 : 47-53
- Dambre J.L. et Malaval P., 1994.** Evaluation des conditions de poursuite de la politique de limitation des extractions de matériaux dans le lit de la Loire du Bec d'Allier à Nantes. Rapport + annexes.
- De Person F., 1994.** Bateliers sur la Loire, CLD.
- Denis, A., 2000.** Étude de la perception et de la gestion des zones humides ligériennes par les acteurs locaux. Univ. Orléans, Mémoire maîtrise géogr., 200 p. + annexes.
- Depret T., 2006.** Le réajustement fluvial des méandres de Guilly (Loiret). Zone Atelier du Bassin de la Loire. Mémoire de 1^{ère} année de master de Géographie, Université Paris 1.
- Desloges J.R. et Church M., 1992.** Geomorphic implications of glacier outburst flooding: Noeick River valley. *British Columbia. Can. J. Earth Sci.*, 29, 551-564.
- Desmedt C., 1999.** *L'utilisation d'un SIG dans le cadre du PNRZH*. Maîtrise de Géographie. Université de Franche-Comté, 108 p.
- Dion R., 1934.** Le Val de Loire. Etude de géographie régionale, Thèse de Doctorat, Université de Tours, 752 p.
- Dion R., 1961.** Etude des levées de la Loire. Paris, 316 p.
- DIREN Centre, 1991.** Atlas des zones inondables dans la vallée de la Loire, Orléans, Service du Bassin Loire-Bretagne, 17 vol.
- DIREN Centre, 2005.** Orientations régionales de gestion et de conservation de la faune sauvage et de ses habitats (O.R.G.F.H.). Région Centre, 91 p.
- Dufour S., 2005.** Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines - Exemples de différents hydrosystèmes rhodaniens. Thèse de Doctorat, Université Jean Moulin – Lyon 3, 243 p.

- Dupieux N., 2004a.** Une proposition de protocole commun pour la description et le suivi des forêts alluviales du bassin de la Loire. Programme Loire nature, mission scientifique, 41 p.
- Dupieux N., 2004b.** Une proposition de protocole commun pour la description et le suivi des annexes hydrauliques du bassin de la Loire. Programme Loire nature, mission scientifique, 51 p.
- Eaton B.C., Lapointe M.F., 2001.** Effects of large floods on sediment transport and reach morphology in the cobble-bed Sainte Marguerite River. *Geomorphology*, 40 : 291-309.
- Edwards P.J., Kollmann J., Gurnell A.M., Petts G.E., Tockner K. et Ward J.V., 1999.** A conceptual model of vegetation dynamics on gravel bars of a large Alpine river. *Wetlands Ecology and Management*, 7 : 141-153.
- EPALA, 1987.** Barrage de Serre de la Fare sur la Loire - Etude d'impact. Orléans, 736 p.
- EPALA, 1988.** Le programme d'aménagement de la Loire et de ses affluents - L'impact des barrages sur le milieu naturel. Orléans, 19 p.
- Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, 1999.** Synthèse des propositions pour une stratégie globale de réduction des risques d'inondation par les crues fortes en Loire moyenne. 62 p.
- Fergusson R.I., 1984.** The threshold between meandering and braiding, *In* Smith, Proceeding of the 1st International Conference on Hydraulic Design, Springer : 615-629.
- Finlayson D.P. et Montgomery D.R., 2003.** Modeling large-scale fluvial erosion in geographic information systems. *Geomorphology*, 53 : 147-164.
- Fouque C., 2006.** Le suivi patrimonial comme outil de connaissance des zones humides. *In* Séminaire ORGFH, les milieux humides. CDRom.
- Galinié, H. et Rodier X., 2000.** Les modifications du trait de la rive gauche de la Loire dans l'ouest de Tours. Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges. Synthèse des résultats du PCR 1996-1999 : 29-36.
- Gallard B. et Le Nevez N., 2001.** Iles de Loire. Conservatoire régional des Rives de Loire et DIREN Orléans, 93 p.
- Garcin M., Carcaud N., Gautier E., Burnouf J., Castanet C., Fouillet N., 2006.** Impact des héritages sur un hydrosystème : l'exemple des levées en Loire moyenne et océanique. *In* Allée Ph., Lespez L. (eds) *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement*, PU Blaise Pascal : 223-236.
- Gasowski Z., 1994.** L'enfoncement du lit de la Loire. *Revue de Géographie de Lyon*, 69/1 : 41-45.
- Gaultier S., 2000,** Etude de l'évolution géomorphologique dynamique de la Loire à Bréhemont. Maîtrise de géographie, Orléans, 125 p. + Ann.
- Gautier E., 1992.** Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviales dans le bassin du Buech (Alpes du Sud). Thèse de Doctorat, Paris X Nanterre, 439 p.
- Gautier E., 2001.** Rythmes d'évolution des zones humides - Approche méthodologique et résultats préliminaires des études morphodynamiques entreprises dans le cadre du Programme National de Recherche sur les Zones Humides de La Loire moyenne. *Études Ligériennes*, nouvelle série 3 : 7-26.
- Gautier E., 2006.** Recherches géomorphologiques sur le fonctionnement des plaines d'inondation. Approches croisées de trois grandes plaines. Thèse HDR, Université Paris 1, 3 vol., 208 p. + annexes.

- Gautier E., Bacchi M., Barbier J., Berton J.-P., Chambaud F., Couderchet L., Denis A., Dieu N., Grosbois C., Josselin D., Kunesch S., Lewis N., Moine A., Négrel, P., Oberti D., Petelet-Giraud E., Rousseau O. et De Sède M.-H., 2001. La détermination d'un espace de liberté pour le système fluvial ligérien : identification et spatialisation des unités morphodynamiques et écologiques fonctionnelles dans les vals libres et endigués de la Loire, enjeux et acteurs sociaux, PNRZH Loire, 211 p.
- Gautier E., Burnouf J., Carcaud N., Chambaud F. et Garcin M., 2007. Les interrelations entre les sociétés et le fleuve Loire depuis le Moyen Âge. In Trémolières M., Schnitzler A. (Ed.) : *Protéger, restaurer et gérer les zones alluviales, pourquoi et comment*, Tec Doc : 83-97.
- Gautier E., Chambaud F. et Couderchet L., 2002. Approche méthodologique des paysages fluviaux de la Loire - l'application à la Loire bourbonnaise. In Actes du colloque *Les paysages ligériens*, Tours mars 2001 : 195 – 203.
- Gautier E., Costard F., 2000. Les systèmes fluviaux à chenaux anastomosés en milieu périglaciaire : la Léna et ses principaux affluents (Sibérie centrale). *Géographie Physique et Quaternaire*, 54/3 : 327-342.
- Gautier E. et Grivel S., 2004. Étude de la dynamique fluviale de la Réserve Naturelle du Val de Loire. Rapport 2003, CNRS, CSNB.
- Gautier E., Piégay H. et Bertaina P., 2000. A methodological approach of fluvial dynamics oriented towards hydrosystem management: the Loire and Allier rivers case study. *Geodyn. Acta*, 13 (1) : 29-43.
- Gibling M.R., Nanson G.C. et Maroulis J.C., 1998. Anastomosing river sedimentation in the Channel County of Central Australia. *Sedimentology*, 45 : 595-619.
- Gilvear D.J., 1999. Fluvial geomorphology and river engineering: future roles utilizing a fluvial hydrosystems framework. *Geomorphology*, 31 : 229-245.
- Gilvear D. et Bryant R., 2003. Analysis of aerial photography and other remotely sensed data. In Kondolf G.M., Piégay H. (Ed.): *Tools in fluvial geomorphology* Wiley : 135 -170.
- Ginestet P. et Gautier J.-N., 1999. Sectorisation géomorphologique de la Loire entre le Bec d'Allier et Montjean-sur-Loire, 50 p.
- Girel J., Vautier F., Peiry J.L., 2003. Biodiversity and land use history of the alpine riparian landscapes (the examples of the Isère river valley, France). In Mander U. & M. Antrop [eds.], *Multifunctional landscapes: continuity and changes in landscapes*, Volume 3, WIT PRESS, Southampton, UK : 167-200.
- Graf W. L., 2005. Geomorphology and American dams: The scientific, social, and economic context. *Geomorphology*, 71 : 3-26.
- Grangeret N., 2005. Compréhension de la construction de la plaine alluviale de la Loire bourbonnaise et enjeux de gestion. Zone Atelier du Bassin de la Loire. Mémoire de 2^{ème} année de master de Géographie, Université Paris 4.
- Grosbois C., 1998. Géochimie des eaux de la Loire : contributions naturelles et anthropiques, quantification de l'érosion. Thèse Science de la Terre, Tours, 232p. + Ann.
- Grosbois C., Négrel P., Fouillac C., Grimaud D., 2000. Chemical and isotopic characterization of the dissolved load of the Loire river. *Chem. Geol.*, 170 : 179-201.

- Groupe d'Hydraulique Numérique (GHN), 1995.** Etude hydraulique bidimensionnelle à la Charité-sur-Loire, analyse des données hydrauliques. Etude réalisée pour le compte de la D.D.E. Nièvre, 15 p.
- Groupe d'Hydraulique Numérique (GHN), 1997.** Etude de solutions d'aménagement à proximité de la chevette de la Charité-sur-Loire. Etude réalisée pour le compte de la D.D.E. Nièvre, 81 p.+ Ann.
- Guérin L., 1996.** Etude morphodynamique de la Loire dans les méandres de Guilly (Loiret) - Programme Life Loire Nature. Mémoire maîtrise géogr., Univ. Orléans, 229 p.
- Gupta A., Hock L., Xiaojing H. et Ping C., 2002.** Evaluation of part of the Mekong River using satellite imagery. *Geomorphology*, 44 : 221-239.
- Gurnell A.M., Montgomery, D.R., 1999.** *Hydrological Applications of GIS*. Wiley, New York, NY, p. 176.
- Gurnell A.M., Peiry J.-L. et Petts G.E., 2003.** Using historical data in fluvial Geomorphology. In Kondolf G.M., Piégay H. (Ed.): *Tools in fluvial geomorphology* Wiley : 77 -101.
- Gustavsson M., Kolstrup E. et Seijmonsbergen A.C., 2006.** A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology*, 22 p.
- Halbecq W., 1996.** Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire entre le Bec d'Allier et Mont-Jean. Mémoire de D.E.A., Orléans, 80 p. + Ann.
- Hassan A., Martin T.C., Mosselman E., 1999.** Island topography mapping for the Brahmaputra-Jamuna River using remote sensing and GIS. In Marriott S.B. et Alexander J. (eds) 1999, Floodplain : Interdisciplinary Approaches, Geological Society, London, Special Publications, 163 : 153-161.
- Heuzé P., Schnitzler A., 2006.** Restauration du système pulsé et libre évolution: deux stratégies complémentaires de préservation de la biodiversité pour les forêts alluviales. Communication, Colloque *Le Réveil du Dodo II*, Paris, 7-9 mars 2006.
- Hupp C.R., Bornett G., 2003.** Vegetation as a tool in the interpretation of fluvial geomorphic processes and landforms in humid temperate areas. In Kondolf G.M. et Piégay H., *Tools in fluvial geomorphology*, Wiley : 269-288.
- Hupp C.R., Morris E.E., 1990.** A dendrogeomorphic approach to measurement of sedimentation in a forested wetland, Black swamp, Arkansas. *Wetlands*, 10 :107-123.
- Hupp C.R., Osterkamp W.R. 1996.** Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology*, 14 : 277-295.
- HYDRATEC, 1989,** Faisabilité d'un plan d'eau sur la Loire à la Charité-sur-Loire. Rapport d'étude pour la D.D.E. Nièvre, 100 p.
- Joyeux E., 2004.** Vers une nouvelle approche de la vulnérabilité face au risque d'inondation. Le cas de l'agriculture dans le Val de la Divatte en basse vallée de la Loire. Zone Atelier du Bassin de la Loire. Mémoire de 2^{ème} année de master de Géographie, Université Paris 8.
- Junk W.J., Bailey P.B., Sparks R.E., 1989.** The flood-pulse concept in river-floodplain systems. *Can. Journ. Fish. Aquat. Sci.*, 106 : 100-127.
- Kesel R.H., 2003.** Human modifications to the sediment regime of the Lower Mississippi River flood plain. *Geomorphology*, 56 : 325-334.

- Knighton A.D., 1998.** Fluvial forms and processes. London : Arnold. 383 p.
- Knighton A.D., Nanson G.C., 1993.** Anastomosis and the continuum of channel pattern. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 18 : 613-625.
- Knighton A.D., Nanson G.C., 1994a.** Flow transmission along an arid zone anastomosing river, Cooper Creek, Australia. *Hydrological Processes*, 8 : 137-154.
- Knighton, A.D. et Nanson, G.C., 1994b.** Waterholes and their significance in the anastomosing channel system of Cooper Creek, Australia. *Geomorphology*, 9 : 311-324.
- Kondolf G.M., 1997.** Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21(4) : 533-551.
- Kondolf M.G., Piegay H., 2003.** Tools in fluvial geomorphology, J. Wiley and Sons, Chichester, Royaume Uni.
- Laboratoire Régional Des Ponts et Chaussées de Blois, 1971.** Les alluvions de la Loire dans la région Centre. *Bull. de Liaison des Ponts et Chaussées*, 56 : 48-68.
- Le Cœur C., 1996.** Eléments de géographie physique. Bréal éd., Paris.
- Leopold L.B., Wolman M.G., 1957.** Rivers channel patterns - braided, meandering and straight. *US Geological Survey Professional Paper*, 282-B : 35-85.
- Lewis, N., 2001.** La gestion intégrée de l'eau en France : critique sociologique à partir d'une étude de terrain (bassin Loire-Bretagne). Thèse, Université d'Orléans.
- Lewis N. et Gautier E., 2004.** Le Domaine public fluvial, un héritage du passé qui module aujourd'hui la réflexion sur la gestion de la biodiversité – Les zones humides de la Loire sous observation. In Burnouf J., Leveau P. (ed.) *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture*. CTHS : 343-354.
- Lewis N., Gautier E. et Denis A., 2004.** Les zones humides au croisement des enjeux sociaux et naturels – regard ligérien. In Barnaud G. et al., *Programme National de Recherche sur les Zones Humides, Actes du colloque de Toulouse* : 254-265.
- Lohr U., 1998.** Digital elevation models by laser scanning, *Photogrammetric Record*, 16 (91) : 105-109.
- Loiseau J-E. et Felzines J-C., 1992.** Variation du peuplement végétal alluvial constatée dans la partie moyenne du bassin ligérien en 1990 et 1991. *Le Monde des Plantes*, 445 : 14-16.
- Lunais B., 1983.** Inventaire des Sites d'Intérêts Ecologiques dans la Vallée de la Loire (lit majeur et coteaux). Fédération Régionale des Associations de Protection de l'Environnement du Centre.
- Maillard P., 1972.** Inventaire des disponibilités alluvionnaires de la Loire entre le Bec d'Allier et Candes-Saint-Martin. *Etudes Ligériennes* : 34-49.
- Malavoi J.R. et BIOTEC, 2007.** Manuel de restauration hydrogéomorphologique des cours d'eau. Agence de l'eau Seine-Normandie, 2 vol.
- Malavoi J.R., Bravard J.P., Piegay H., Heroin H. et Ramez P., 1998.** Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau, Agence de bassin Rhône-Méditerranée-Corse, guide technique n°2, 38 p.
- Mamam L., 1998.** Témoin du fonctionnement écologique de la Loire : la végétation alluviale. *La Loire et ses terroirs*, 27 : 29-32.
- Maman, L. 1999.** La végétation des annexes fluviales, un indicateur pertinent pour leur restauration, Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, 5 p.

- Mantellier P., 1867**, Histoire de la communauté des marchands fréquentant la rivière de Loire et Fleuves descendant en icelle par, Orléans, 3 vol.
- Marron D.C., 1992**. Flooding storage of mine talling in the Belle Fourche river system : a sediment budget approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17: 675-687.
- Marston R.A., Girel J, Pautou G., Piegay H., Bravard J.P. et Arneson C., 1995**. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology*, 13 : 121-131.
- Martinhac L., 2003**. La Loire, espace délaissé ou convoité ? Le paradoxe de la mise en place des champs captant dans une Réserve Naturelle. Zone Atelier du Bassin de la Loire. Mémoire de 2^{ème} année de master de Géographie, Université Paris 8.
- Michot A., 1955**. La Loire et ses mariniers. Ed. Delayance, 65 p.
- Miéjac E., 1999**. Passer la Loire, ponts, bacs et gués au fil du fleuve autour de la Boucle d'Orléans : les lieux de franchissement de la Loire de Cosne-sur-Loire à Chaumont-sur-Loire aux époques médiévale et moderne, Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Lille.
- Miliaresis G. C., 2001**. Extraction of bajadas from digital elevation models and satellite imagery. *Computers & Geosciences*, 27 : 157-1167.
- Miller, J.R., 1991**. Development of anastomosing channels in south-central Indiana. *Geomorphology*, 4 : 221-229.
- Moatar F. et Gailhard., 2006**. Water temperature behaviour in the Loire river since 1881 and 1976. *C.R. Géoscience*, vol.338, 5 : 319-328.
- Moatar F. et Meybeck M., 2003**. Compared performances of different algorithms for estimating annual nutrient loads discharged by the eutrophic river Loire. *Hydrological Processes*.
- Mollard J.D., 1973**. Airphoto interpretation of fluvial features, *Proceeding of the 9th Canadian Hydrology Symposium*, Edmonton, National Research Council of Canada : 341-380.
- Nabet F., 2005**. Impact hydrologique et sédimentaire de la chevette de La Charité-sur-Loire. (Programme Friches hydrauliques), Mémoire de 1^{ère} année de master de Géographie, Université Paris 8.
- Nabet F., 2006**. Evaluation de l'efficacité géomorphologique des travaux d'entretien du lit de la Loire. Mémoire de 2^{ème} année de master de Géographie, Université Paris 1.
- Nanson G.C. et Knighton A.D., 1996**. Anabranching rivers : their cause, character and classification, *Earth Surface Processes and Landforms*, 21 : 217-239.
- Négrel P. et Grosbois C., 1999**. Changes in chemical and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr signature distribution patterns of suspended matter and bed sediments in the upper Loire river basin (France). *Chem. Geol.*, 156 : 231-249.
- Négrel P., Petelet-Giraud E., Barbier J. et Gautier E., 2003**. Surface water groundwater interactions in a alluvial plain: chemical and isotopic systematics. *Journal of Hydrology*, 277 : 248-267.
- Nguyen T.D., Belleudy P., Peiry J.L., Girel J. et Sauvaget P., 2002**. Hydrodynamique et végétation d'une île de l'Isère. *La Houille Blanche*, 2 : 24-31.
- Noizet H., Carcaud N. et Garcin M., 2004**. Rive droite rive gauche : la Loire et Tours (12^{ème} -15^{ème} siècles). In Burnouf J., Leveau Ph. (Eds), *Fleuves et marais, une histoire au*

croisement de la nature et de la culture. CTHS (Archéologie et histoire de l'art, 19) : 137-155.

Oberti D., Chambaud F. et Simonnot J.-L., 2000. Inventaire des zones humides de Bourgogne. Volume 1 : concepts, méthodes et typologie. CAE université de Bourgogne, DIREN Bourgogne.

Okabe, A. Boots et B., Sugihara, K., 1992. Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams. New York. Wiley.

Osterkamp W.R., 1998. Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake River, Idaho. *Wetlands* 18/4 : 530-545.

Pardé M., 1934. Fleuves et rivières. Ed. A. Colin, Paris, 241 p.

Pardé, M., 1960. Etude potamologique sur la Loire et ses affluents. *Norôis*, 44bis, 183 p.

Passega, R., 1957. Textures as characteristic of clastic deposition. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 9 : 1952-1984.

Pautou G., 1984. L'organisation des forêts alluviales dans l'axe rhodanien entre Genève et Lyon ; comparaison avec d'autres systèmes fluviaux. *Document de Cartographie Ecologique*, 27 : 43-64.

Pautou G., Girel J. et Borel J.-L., 1989. Les changements de végétation dans les systèmes fluviaux : L'exemple de la vallée du Rhône entre Genève et Lyon. *In La ville et le fleuve*, 112ème Congrès national des sociétés savantes, CTHS : 61-71.

Pautou G., J. Girel et L. Maman, 1985. Le rôle des processus allogéniques dans le déroulement des successions végétales : l'exemple de la plaine alluviale du Rhône entre Lyon et Genève. *In Colloques phytosociologiques, XIII, Végétation et géomorphologie*, Bailleul 1985, J. Cramer, Berlin- Stuttgart, 656-667.

Pautou G. et Wuillot J., 1989. La diversité spatiale des forêts alluviales dans les îles du haut Rhône français. *Bulletin d'Ecologie*, 20 : 211-230.

Peguy C., 1913. Présentation de la Beauce à Notre Dame de Chartres.

Peiry J.-L., 1988. Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie). Thèse Géographie et Aménagement, Lyon, 378 p.

Peiry J.L., 1997. Recherches en géomorphologie fluviale dans les hydrosystèmes fluviaux des Alpes du Nord. Diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Joseph Fourier, 308 p.

Petts G.E., Möller H., Roux A.L. (eds), 1989. Historical change of large alluvial rivers : Western Europe. Wiley, 355 p.

Piégay H., 1995. Dynamique et gestion de la ripisylve de cinq cours d'eau à charge grossière du bassin du Rhône. Thèse de Doctorat, Université Paris IV - Sorbonne, 455 p.

PIREN Rhône, 1982. Cartographie polythématique appliquée à la gestion écologique des eaux. Étude d'un hydrosystème fluvial : le Haut Rhône français. Ouvrage collectif, Ed. du CNRS-Lyon, 113 p.

Plan Loire Grandeur Nature, 2002. Restauration et entretien du lit de la Loire et de ses affluents - Guide méthodologique, 2 vol.

Pyle C.J., Chandler J.H. et Richards K.S. 1997. Digital photogrammetric monitoring of river bank erosion. *Photogrammetric Record*, 15 : 753-764.

- Ramond S., 2006.** Diagnostic géomorphologique et propositions de réaménagement d'une zone humide : le Gour des Fontaines (Nièvre). Mémoire de 1^{ère} année de master de Géographie, Université Paris 8.
- Rapeau A., 1997,** La dynamique fluviale de la Réserve Naturelle du Val de Loire. Conservatoire des Sites Naturels Bourguignons, 46 p. + Annexes
- Rapport d'Ingénieur, 1856,** Rapport d'un Ingénieur ordinaire de la Navigation des Ponts et Chaussées sur le Passage en amont de Châtillon, 20 janvier 1856. Musée de Châteauneuf-sur-Loire, Réf M2318D2.
- Rapport ZAL, 2002,** Rapport d'activité 2002-2003 de la Zone Atelier Bassin Versant de la Loire, 73 p.
- Rice S., Church M. 1996,** Bed material texture in low order streams on the Queen Charlotte Islands - British Columbia. *Earth Surf Process Landforms*, 21: 1-18
- Ricou G., 1995.** Restauration du lit de la Loire entre la Charité-sur-Loire et Mesves-sur-Loire. M.S.T. IMACOF, Tours, 67 p. + Ann. + Cartes
- Rodrigues S., 2004.** Dynamique sédimentaire et végétation : évolution de chenaux fluviaux en Loire moyenne (France). Thèse de Doctorat, Université François Rabelais Tours, 426 p.
- Rousseau O., 1999.** Etude de la dynamique des chenaux secondaires en Loire Moyenne. Maîtrise Géogr., Univ. Orléans, 125 p.
- Ruffinoni C., Trémoillère M. et Sanchez-Peréz J.M., 2003.** Végétation alluviale et flux de nutriments. In : Piégay H., G. Pautou & C. Ruffinoni, *Les forêts riveraines des cours d'eau*, IDF, 134-154.
- Rust B.R., 1978.** A classification of alluvial channel systems, p. 187-198. *Fluvial Sedimentology. Canadian Society of Petroleum Geology Memoir* 5.
- Rust B.R., 1981.** Sedimentation in a arid-zone anastomosing fluvial system : Cooper Creek, central Australia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51 : 745-755.
- Salvador P.-G., 1991.** Le thème de la métamorphose dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère -bassin de Malville et ombilic de Moirans (Bas-Dauphiné). Thèse doct. géographie Univ. Lyon III : 496 p.
- Sarma J.N., 2005.** Fluvial process and morphology of the Brahmaputra River in Assam, India, *Geomorphology*, 70 : 226-256.
- Sarma J.N. et Phukan M.K., 2004.** Origin and some geomorphological changes of Majuli island of the Brahmaputra River in Assam, India. *Geomorphology*, 60 : 1-19.
- Schnitzler A., 1995.** Les forêts alluviales des lits majeurs de l'Allier et de la Loire moyenne entre Villeneuve/Allier et La Charité/Loire - Etude phytosociologique, diagnostic de naturalité et propositions de renaturation. Laboratoire de phytoécologie, Université de Metz - 30 p. + planches + annexes.
- Schnitzler A., 1996.** Comparison of landscape diversity in forests of the upper Rhine and the middle Loire floodplains (France). *Biodiversity and Conservation*, 5 : 743-758.
- Schnitzler-Lenoble A. et Carbiener R., 2007.** Forêts alluviales d'Europe ; écologie, biogéographie, valeur intrinsèque. Editions TEC et DOC.
- Schumann, R.R., 1989.** Morphology of Red Creek, Wyoming, an arid-region anastomosing channel system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14 : 277-288.

- Schumm S.A., 1968.** River adjustment to altered hydrologic regimen – Murrumbidgee River and paleochannels, sedimentologic implications, *USGS Professional Paper*, 598 : 65 p.
- Schumm, S. A. 1969.** River metamorphosis. *J. Hydraul. Div. ASCE*, 95 : 255–273.
- Schumm, S.A. 1977.** The fluvial system. John Wiley and Sons, New York, 338 p.
- Schumm S.A., 1981.** Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications, *Society of Economic Paleontologist and Mineralogists Special Publication*, 31 : 19-29
- Service Hydrologique Centralisateur Bassin Loire-Bretagne, 1988.** Reconstitution des débits des crues anciennes à Givry-Fourchambault, Nevers, Le Veudre – Etablissement de la loi de fréquences rares pour les crues, 35 p. + annexes.
- Smith D.G., 1976.** Effect of vegetation on lateral migration of anastomosed channels in a glacier meltwater river. *Geological Society of America Bulletin*, 87 : 857-860.
- Smith, D.G., 1983.** Anastomosed fluvial deposits : Modern examples from Western Canada, p.155-168. *In* Modern and ancient fluvial systems. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 6.
- Smith D.G., 1986.** Anastomosing river deposits sedimentation rates and basin subsidence, Magdalena river, Northwestern Columbia, South America. *Sedimentary Geology*, 46 : 177-196.
- Smith D.G. et Putnam P.E., 1980.** Anastomosed river deposits: modern and ancient examples in Alberta, Canada. *Canadian Journal of Earth Science*, 17 : 1396-1406.
- Smith D.G. et Smith N.D., 1980.** Sedimentation in anastomosed river systems : examples from alluvial valleys near Banff, Alberta. *Journal of Sedimentary Petrology*, 50 : 157-164.
- SOGREAH, 1997.** Etude de l'aménagement de la Loire au droit de Pouilly-sur-Loire. Rapport d'étude, 23 p.
- Steiger J., Corenblit D. et Vervier P., 2000.** Les ajustements morphologiques contemporains du lit mineur de la Garonne, France et leurs effets sur l'hydrosystème fluvial. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl.bd 122 : 227–246.
- Steiger J. et Gurnell A.M., 2003.** Spatial hydrogeomorphological influences on sediment and nutrient deposition in riparian zones : observations from the Garonne River, France. *Geomorphology*, 49 : 1-23.
- Steiger J., Gurnell A.M., Ergenzinger P. et Snelder D., 2001.** Sedimentation in the riparian zone of an incising river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26 : 91– 108.
- Temam S., 2005.** Perception et gestion du risque d'inondation par les ingénieurs de la Loire, à travers l'étude des aménagements fluviaux réalisés entre Nevers et Cosne-sur-Loire au 18^{ème} et 19^{ème} siècle. Mémoire de D.E.A., Université Paris VIII.
- Tockner K., Baumgartner C., Schiemer F. et Ward J.V. 2000.** Biodiversity of a Danubian floodplain : structural, functional and compositional aspects. *In Biodiversity in wetlands : assessment, function and conservation*. (Eds B. Gopal, W.J. Junk et J.A. Davis), 1, pp 141-159. Backhuys Publishers, Leiden.
- Tricart J., 1977.** Précis de géomorphologie. Sedes, Paris.
- Van der Nat D., Tockner K., Edwards P.J., Ward J.V. et Gurnell A.M., 2002.** Habitat change in braided floodplains (Tagliamento, NE Italy). *Freshwater Biology*, 48: 1799-1812.

- Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R. et Cushing C.E., 1980.** The river continuum concept. *Can. Journ. Fish. Aquat. Sci.*, 37 : 130-137.
- Vautier F., 2000,** Dynamique géomorphologique et végétalisation des cours d'eau endigués : l'exemple de l'Isère dans le Grésivaudan. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, 376 p.
- Viers G., 1967,** Eléments de géomorphologie. Nathan, Paris.
- Wasson JG, Bèthemont J., Degorce JN., Dupuis B., Joliveau T., 1993.** Approche écosystémique du bassin de la Loire : éléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion. Phase 1 : État Initial. Problématique / Rapport d'étape, CEMAGREF : 102 et 81 p.
- Wasson J.G., Malavoi J.R., Maridet L., Souchon Y. et Paulin L., 1995.** Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Rapport EPTEAU et Cemagref, 168 p.
- Wolski P. et Savenije H.H.G., 2006.** Dynamics of floodplain-island groundwater flow in the Okavango Delta, Botswana. *Journal of Hydrology*, 320 : 283–301.
- Woudstra A., 2005.** La gestion de la crue de décembre 2003 dans la moyenne vallée de la Loire. Mémoire de 1^{ère} année de master de Géographie, Université Paris 1.

Liste des figures

Figure 1. Réponses d'un système fluvial aux modifications brutales d'une variable de contrôle (d'après Knighton, 1984 in Rollet, 2007, modifiée).....	16
Figure 2. Localisation des bras secondaires étudiés dans les sites ateliers de la Charité-sur-Loire et Mesves.....	25
Figure 3. Localisation et caractéristiques physique du bassin versant de la Loire (Source : IGN)...	28
Figure 4. Caractéristiques du profil en long de la Loire, la pente du secteur de la Loire moyenne varie entre 0,5 et 0,3 m/km (source des données: Brossé 1982, adaptée).....	30
Figure 5. localisation des site ateliers dans le schéma de la structure géologique de la Loire moyenne (réalisé par Champion et <i>al.</i> , 1971).....	31
Figure 6. Carte géologique du bassin versant de la Loire (source : BRGM).....	32
Figure 7. Morpho-régions du bassin de la Loire Les dix-huit mor-phorégions selon Bethemont et Degorce (<i>in</i> Wasson et <i>al.</i> , 1993) figurent en légende suivant le regroupement préconisé en sept régions majeures.....	34
Figure 8. Profils longitudinaux comparés de la Seine et de la Loire (d'après Dion, 1934).....	35
Figure 9. Largeur du val entre Navers et Saumure (Loire moyenne) d'après Champion et <i>al.</i> , 1971(modifiée).....	36
Figure 10. Variation longitudinal de l'épaisseur des alluvions en Loire moyenne entre le Bec d'Allier et Candes Saint-Martin.....	37
Figure 11. Parts respectives de la Loire et de l'Allier dans le débit moyen annuel au bec d'Allier, de 1955 à 1968 (source : Dacharry 1974) montrant la double fluctuation des débits annuels.....	40
Figure 12. Débits mensuels calculés sur 45 ans (1967 - 2011) à la station de Givry.....	41
Figure 13. Variabilité inter-annuelle du régime hydrologique de la Loire entre 1971 et 2009. (Station de Givry).....	42
Figure 14. Mise en relation de la dynamique latérale du fleuve et de l'emplacement des levées....	46
Figure 15. Emplacement des centrales nucléaires et des grands barrages dans le bassin de la Loire.....	48
Figure 16. Reconstruction du profil en long de Mesves à Tracy-sur-Loire à partir des talwegs (Grivel, 2008).....	51
Figure 17. Evolution du profil en long du Bec d'Allier à Saumur.....	51
Figure 18. La Loire un important axe de communication et d'échanges commerciaux. Des canaux assurent la connexion de la Loire avec le Rhône et la Seine.....	55
Figure 19. Les enjeux majeurs de la Loire.....	56

Figure 20. Synthèse des travaux réalisés afin d'étudier les alluvions de la Loire depuis la deuxième moitié du 19ème siècle.....	58
Figure 21. Localisation des sites ateliers.....	62
Figure 22. La chevrette du site de La Charité-sur-Loire (a), la brèche (60 m) au niveau de son extrémité amont (b).....	65
Figure 23. Avis de l'ingénieur en chef, 1887 au sujet de la restauration de la chevrette de La Charité-sur-Loire (Nabet, 2005, source : archive de la DDT 58).....	66
Figure 24. Présentation du site atelier n° 1 : la Charité-sur-Loire.....	69
Figure 25. Site atelier de la Charité-sur-Loire, identification des différents éléments constituant le paysage fluvial.....	71
Figure 26. Présentation du site atelier n°2 : Mesves.....	72
Figure 27. Site atelier de Mesves, identification des différents éléments constituant le paysage fluvial.....	75
Figure 28. Présentation du site atelier n° 3 : les méandres de Guilly.....	76
Figure 29. Site atelier de Guilly, identification des différents éléments constituant le paysage fluvial.....	78
Figure 30. Site atelier de La Charité-sur-Loire avant la construction de la chevrette. (Source : Musée de la Charité sur Loire).....	82
Figure 31. Typologie des travaux de restauration et d'entretien des différentes unités fluviales...	87
Figure 32. Site atelier de La Charité-sur-Loire, typologie des travaux de restauration et entretien réalisés dans le lit mineur (source : F. Nabet, 2006 modifiée, image aérienne 2005).....	88
Figure 34. Communiqué de presse relatif aux travaux de restauration du site de La Charité-sur-Loire (source : DDT 58).....	89
Figure 35. Site atelier de Mesves, typologie des travaux de restauration et entretien réalisés dans le lit mineur (source : F. Nabet, 2006 modifiée, image aérienne 2005).....	90
Figure 36. Site atelier de Guilly, typologie des travaux de restauration et entretien réalisés dans le lit mineur (source : F. Nabet, 2006 modifiée, image aérienne 2005).....	91
Figure 37. Emboîtement des échelles spatio-temporelles d'analyse.....	99
Figure 38. Synthèse du protocole de mesure et d'analyse.....	100
Figure 39. Exemple de créations de la base de données, site atelier de La Charité-sur-Loire.....	103
Figure 40. Identifications des unités fluviales.....	105
Figure 41. Exemples de comparaison des formes fluviales (1969 -2005).....	105
Figure 42. Exemples de numérisation des unités fluviales (constitution de la base de données)...	106

Figure 43. Exemple d'organisation des données altimétriques de la ligne d'eau (source : DREAL Centre).....	108
Figure 44. Exemple de comparaison de deux profils en long à l'échelle du site d'étude.....	109
Figure 45. Localisation du radier et de l'échelle de mesure dans le site de la Charité-sur-Loire...	101
Figure 46. Principe de la mesure topographique à haute résolution altimétrique.....	113
Figure 47. Principe de réalisation des mesures bathymétriques (site atelier de Guilly).....	115
Figure 48. Protocoles de mesures bathymétriques et topographiques (site ateliers de La-Charité-sur-Loire).....	116
Figure 49. Protocoles de mesures bathymétriques et topographiques (site atelier de Mesves).....	117
Figure 50. Protocoles de mesures bathymétriques (site ateliers de Guilly).....	118
Figure 51. Exemple de comparaison de profils transversaux,.....	122
Figure 52. Exemple de réactualisation des profils « Crougreau » et reconstitution de profil en long à partir de 6 profils transversaux.....	122
Figure 53. Exemple de création de MNT (site atelier de Mesves).....	123
Figure 54. Validation du modèle par l'identification des unités fluviales sur le terrain.....	124
Figure 55. Bilan sédimentaire réalisé dans le site atelier de la Charité-sur-Loire.....	125
Figure 56. Principe du fonctionnement de la technique du ballon captif.....	127
Figure 57. Drapage des photographies à haute résolution spatiale sur le M.N.T, site-test : rive gauche de La Charité-sur-Loire.....	128
Figure 58. Exemple d'analyse de l'impact de la végétation sur la topographie (site de la Charité-sur-Loire).....	129
Figure 59. Les différentes forces exercées sur un grain en équilibre.....	133
Figure 60. Les trois modes de transport de la charge solide.....	133
Figure 61. Les paramètres physiques contrôlant le mouvement de sédiment au sein du chenal...	136
Figure 62. Mise en mouvement des sédiments en fonction de la valeur du paramètre de Shields, classification proposée par Ramette.....	137
Figure 63. Localisation des prélèvements sédimentaires (site de La Charité-sur-Loire).....	139
Figure 64. Classification des tamis selon la norme AFNOR.....	140
Figure 65. Analyse des prélèvements sédimentaire au laboratoire, méthode de tamisage.....	141
Figure 66. Exemple de reconstitution d'une courbe granulométrique.....	143

Figure 67. Protocole de mesure des galets selon la méthode appliquée par Kellerhals et Bray (1971).....	146
Figure 68. Localisation des points de prélèvements des matières en suspension (site ateliers de la Charité).....	147
Figure 69. Prélèvement de matières en suspension, (1) mise en eau du préleveur, (2) récupération de l'échantillon.....	148
Figure 70. Protocole d'analyse des prélèvements de M.E.S.....	155
Figure 710 Extractions de matériaux exprimées en millions de tonnes dans les lits majeurs et mineurs de la Loire et de ces affluents entre 1981 et 1993. (Source des données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	155
Figure 711 Extractions de sédiments en tonne /km dans la Loire et ces affluents entre 1981 et 1993..	158
Figure 73. Extractions de matériaux par département en amont du Bec d'Allier entre 1981 et 1993. (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	159
Figure 74 Évolution annuelles des extractions de matériaux par département en amont du Bec d'Allier entre 1981 et 1993, dans le lit majeur et le lit mineur (Source des données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	160
Figure 75 Évolution interannuelles des extractions de granulats en Loire amont entre 1981 et 1993 (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	161
Figure 76 Extractions de matériaux par département dans le lit majeur de la Loire en aval du Bec d'Allier entre 1981 et 1993. (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	162
Figure 712 Évolution annuelles des extractions de matériaux par département en aval du Bec d'Allier entre 1981 et 1993. (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	163
Figure 713 Évolution interannuelles des extractions de matériaux dans le lit majeurs en aval du Bec d'allier pour la période 1981 – 1993. (Source des données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	166
Figure 79. Évolution interannuelles des extractions de sédiments dans les départements en Loire moyenne. (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	167
Figure 80. Répartition par départements des extractions de matériaux alluvionnaire effectués dans le lit mineur en Loire moyenne. (Source des données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	168
Figure 81. Évolution interannuelles des extractions de sédiments en basse Loire (département de Maine et Loire et Loire atlantique). (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	170
Figure 82. Évolution annuelle des extractions de matériaux dans le lit mineur de la Loire entre 1960 à 1994 (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	170

Figure 83. Valeurs totales des extractions effectuées dans le lit mineur de la haute, la moyenne et la basse Loire (Source des données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	171
Figure 84 Évolution de la densité moyenne des extractions de granulat entre 1949 et 1992. (Source de données : Dambre et Malaval, 1993 ; Dambre, 1995).....	174
Figure 85. Les différents moyens d'extraction de granulats dans le lit de la Loire (source : Champion et al., 1971).....	176
Figure 86. Évolution verticale du profil en long de la surface de l'eau entre Cours-les-Barres et Saumur pour la période 1978 – 1988 (source des données : DREAL Centre).....	178
Figure 87. Évolution verticale de la ligne d'eau entre Cours-les-Barres et Saumur pour la période 1978 – 2005 (source de données : DREAL Centre).....	180
Figure 88. Évolution des pentes des biefs reliant les échelles de mesures sur le tronçon allant de Cours-les-Barres à Saumur (période 1978 – 2005).....	181
Figure 89. Évolution verticale des lignes d'eau entre Cours-les-Barres et Saumur pour la période 2003 – 2011 (source des données : DREAL Centre).....	190
Figure 90. Mise en relation de l'évolution des extractions de granulat et du mode d'ajustement du fond du chenal principal de la Loire entre Cours-les-Barres et Saumur.....	192
Figure 91. Rapprochement des résultats de l'évolution de la largeur de la bande végétalisée (a) et l'évolution verticale des profils de la ligne d'eau (b), (1978 – 2005).....	193
Figure 92. Cartes du site de la Charité-sur-Loire en 1760.....	194
Figure 93. Localisation du site d'extraction dans le secteur de La Charité-sur-Loire.....	195
Figure 94. Site atelier de la Charité-sur-Loire : évolution des formes en plan et mise en évidence des périodes de changement de style fluvial.....	198
Figure 95. Évolution des surfaces des formes fluviales dans le lit mineur et détermination des pas de temps relatives au changement du style fluvial (site de La Charité-sur-Loire).....	198
Figure 96. Site de la Charité-sur-Loire : migration latérale du bras principal vers la rive droite engendrant une importante zone d'érosion de la berge en rive droite.....	199
Figure 97. Site de La Charité-sur-Loire : exemple d'évolution du franc-bord en rive droite.	
Figure 98. Évolution des différentes unités fluviales dans le lit mineur.....	200
Figure 99. Évolution des surfaces des unités fluviale au cours de la période 1850 – 2005, (site de La Charité-sur-Loire).....	202
Figure 100. Évolution des surfaces d'érosion et de sédimentation entre 1850 et 1984.....	203
Figure 101. Évolution des surfaces affectées par l'érosion et par la sédimentation entre 1984 et 2005.....	204
Figure 102. Érosion de l'île et formation d'un chenal en arrière de la Chevrette.....	205

Figure 103. Synthèse de l'évolution spatiale du secteur de sédimentation et d'érosion sur la période d'étude (1850 – 2005).....	206
Figure 104. Site atelier de Mesves : évolution des surfaces des formes fluviales dans le lit mineur et détermination des périodes relatives au changement du style fluvial.....	207
Figure 105. Site atelier de Mesves : évolution des formes en plan et mise en évidence des périodes de changement de style fluvial.....	208
Figure 106. Localisation du site d'extraction dans le secteur de Mesves.....	209
Figure 107. Évolution spatiale des formes fluviales entre 1850 et 2005 (en km ²).....	210
Figure 108. Site de Mesves : évolution des surfaces des unités fluviales calculées (en pourcentage) pour la période 1850 – 2005.....	212
Figure 109. Site atelier de Mesves : évolution des surfaces affectées par l'érosion et par la sédimentation entre 1850 et 2005.....	214
Figure 110. Site atelier de Guilly : évolution des formes en plan et mise en évidence de la rétraction de la bande active.....	215
Figure 111. Localisation du site d'extraction dans le secteur de Guilly.....	216
Figure 112. Secteur des Pré-Boutrons avant et après travaux de dévégétalisation.....	217
Figure 113. Influence des extractions de sédiments sur l'évolution spatiale du bras des Mahis....	218
Figure 114. Localisation des seuils naturels et artificiels dans le site atelier de Guilly.....	219
Figure 115. Site atelier de Guilly : évolution des surfaces des unités fluviales calculées sur la période 1850 – 2005.....	220
Figure 116. Évolution spatiale des formes fluviales entre 1850 et 2005 dans le site de Guilly (km ²).....	222
Figure 117. Évolution des surfaces érodées et sédimentées entre 1850 – 2005, on constate une tendance permanente à la sédimentation.....	225
Figure 118. Évolution spatiale de la bande active dans les trois sites atelier : Mesves, Guilly et La Charité (1850 – 2005).....	226
Figure 119. Rythme annuel d'évolution de la surface occupée par la bande active sur les trois sites ateliers.....	226
Figure 120. Influence de la chevrette sur le flux liquide dans le site de La Charité-sur-Loire.....	227
Figure 121. Rapprochement du mode de l'évolution latérale de la ligne du talweg entre 1850 à 2002, exemple des sites ateliers de Mesve et de la Charité-sur-Loire.....	228
Figure 122. Évolution spatiale du couvert végétal dans les trois sites atelier : Mesves, Guilly et La Charité (1850 – 2005).....	230

Figure 122. Modalités de l'évolution spatiale du couvert végétal dans les trois sites ateliers.....	234
Figure 123. Rythme d'évolution spatiale du bois dur et des séquences végétales en cours de développement.....	235
Figure 124. Rapprochement du mode d'évolution des sites ateliers avec le modèle de Pautou et Ruffinoni (1996).....	236
Figure 125. Évolution du rapport « longueur/ largeur » des îles dans les trois sites ateliers.....	238
Figure 126. Chronique des crues survenues entre 1825 et 2002, stations de Givry (source Gautier, 2008, modifiée).....	239
Figure 127. Hiérarchie des éléments agissant sur la dynamique morpho-sédimentaire de nos secteurs d'étude (Inspiré de Piègay et <i>al.</i> , 2003).....	240
Figure 128. Site atelier de la Charité-sur-Loire : répartition spatial des bancs de sables et des mouilles dans le chenal principal.....	244
Figure 129. Localisation et évolution des profils transversaux dans la zone amont, profils 1 à 4 (2005 – 2011).....	246
Figure 130. Localisation des profils transversaux dans la zone médiane (2005 – 2011).....	247
Figure 131. Évolution des profils transversaux dans la zone médiane, profils 5 à 8 (2005 – 2011).....	249
Figure 132. Localisation des profils transversaux dans la zone aval.....	250
Figure 133. Évolution du profil en long entre 2005 et 2011.....	253
Figure 1314. Évolution des taux annuels moyen d'érosion et de sédimentation entre (2008 et 2011).....	255
Figure 135. Influence de la chevrette sur la répartition spatiale des flux solide et liquide	257
Figure 136. Caractéristiques de l'évolution topographique de la partie amont du chenal (A) entre 2008 et 2010, on constate pour le MNT de 2010, une tendance à revenir à la forme topographique de 2008.....	259
Figure 137. Budget sédimentaire calculé pour les années 2008 – 2009 et 2009 – 2010.....	260
Figure 137. Évolution topographique de la partie aval du chenal (A) entre 2008 et 2010.....	261
Figure 138. Bilan sédimentaire calculés pour les années 2008 – 2009 et 2009 - 2010,.....	262
Figure 139. Mise en relation de l'évolution topographique et l'extension spatiale du couvert végétal.....	263
Figure 140. Influence des anciens aménagements fluviaux sur le stock sédimentaire et l'extension du couvert végétal (fixation de sédiments).....	265
Figure 141. Évolution spatiale du couvert végétal entre 2008 et 2010.....	267

Figure 142. Évolution topographique du chenal (B) entre 2008 et 2011, un impact morphogène de la crue 2008 en faveur de la sédimentation.....	270
Figure 143. Évolution topographique des profils transversaux entre 2010 et 2011 (partie amont, chenal E).....	271
Figure 144. Évolution topographique des profils transversaux entre 2010 et 2011 (partie médiane, chenal E).....	272
Figure 145. Évolution topographique des profils transversaux entre 2010 et 2011 (partie aval, chenal E).....	274
Figure 146. Identification des secteurs de sédimentation et d'érosion et mise en relation avec la répartition spatiale des seuils rocheux et des îles.....	273
Figure 147. Une omniprésence de seuils rocheux susceptible de modifier la dynamique morphosédimentaire.....	275
Figure 148. Localisation des mouilles dans le site atelier de Guilly en 1970 (Y. Babonaux) et en 2010.....	275
Figure 149. Évolution topographique du plancher alluvial entre 2008 et 2010 (Partie amont)...	276
Figure 150. Budget sédimentaire calculé pour les années 2008 – 2009 et 2009 – 2010 dans la partie amont du site atelier de Guilly.....	276
Figure 151. Site atelier de Guilly : évolution topographique du plancher alluviale entre 2008 et 2010 (Partie médiane).....	277
Figure 152. Budget sédimentaire calculé pour les années 2008 – 2009 et 2009 – 2010 dans la partie médiane.....	277
Figure 153. Évolution topographique du plancher alluvial entre 2008 et 2010 (Partie aval).....	278
Figure 154. Site atelier de Guilly : budget sédimentaire calculé pour les années 2008 – 2009 et 2009 – 2010 dans la partie aval,.....	279
Figure 155. Évolution des profils topographiques transversaux réalisés dans la partie amont du site atelier de Guilly actualisation des profils « Crougnaux » (1995 – 2010).....	281
Figure 156. Évolution des profils topographiques transversaux réalisés dans la partie aval du site atelier de Guilly actualisation des profils « Crougnaux » (1995 – 2010).....	282
Figure 157. Évolution du profil en long entre 1995 et 2010, site atelier de Guilly.....	282
Figure 158. Localisation des profils transversaux réalisés dans le site atelier de Mesves entre 2008 et 2010.....	284
Figure 159. Évolution topographique des profils transversaux réalisés dans le chenal principal, site de Mesves (2008 – 2010).....	285
Figure 160. Évolution du profil en long entre 2008 et 2011, site atelier de Mesves.....	286

Tableau 23. Synthèse de l'évolution topographique des profils transversaux (2005 – 2011), site atelier de Mesves.....	289
Figure 161. Évolution topographique et calcul du budget sédimentaire pour la période 2009 -2010, partie amont du bras secondaire, site atelier de Mesves.....	290
Figure 162. Évolution topographique de la partie médiane du site atelier de Mesves, période : 2004 – 2010.....	291
Figure 163. Evolution topographique et calcul du bugdet sédimentaire pour la période 2008 -2010, partie avaldu bras secondaire, site atelier de Mesves.....	291
Figure 164. Évolution des débits et de la concentration des Matières En Suspension lors de la crue de novembre 2008.....	293
Figure 165. Évolution verticale des concentrations de M.E.S en fonctions des débits (Q).....	295
Figure 166. Variation transversale des concentrations de M.E.S en fonctions des débits (Q) et de la Profondeur, site de La Charité sur Loire.....	297
Figure 167. Détermination du débit à pleins bords en utilisant le rapport « largeur/profondeur » d'après Knighton (1984).....	298
Figure 168. Modèle conceptuel illustrant la complexité de la dynamique fluviale.....	317
Figure 169. Répartition hiérarchique des composantes de l'hydrosystème fluvial. D'après Amoros et Petts, 1993.....	321
Figure 170. illustration du concept de continuum fluvial selon Vannote et al., 1980.....	323
Figure 171. Variation selon un gradient longitudinal de la largeur et de la composition spécifique de la ripisylve depuis le tronçon amont du Tech jusqu'à son embouchure. D'après Pinay et <i>al.</i> , 1990 in Piégay et <i>al.</i> , 2003.....	325
Figure 172. Evolution saisonnière du niveau d'eau dans une plaine boisée en Amérique du Nord.	
Figure 173. Différents cas d'évolution du style fluvial.....	326
Figure 174. Rapprochement du modèle de réajustement proposé par Sear (1996), avec l'évolution des formes en plan du site ateliers de la Charité-sur-Loire.....	327
Figure 175. Représentation dans un système tridimensionnel des deux points d'équilibre selon le modèle de Graf et rapprochement avec le cas de la Loire moyenne.....	329
Figure 176. Rivières à lit unique : (a) rectiligne, (b) à lit mineur sinueux.....	330
Figure 177. Exemple de rivière à méandre.....	331
Figure 178. vitesse de migration des méandres. D'après Hickin et Nanson, 1975.....	332
Figure 179. Exemple des étapes de recoupement de méandre sur la rivière Dane (Hooke, 1995).....	333
Figure 180. Exemple de rivière en tresse.....	334

Figure 181. Exemple de rivière à lit anastomosé.....	334
Figure 182. Les six types de systèmes à anabranches d'après Nanson et Knighton, 1996.....	335
Figure 197. Exemple de segmentation d'un tronçon de la Loire moyenne en utilisant comme indicateur la largeur de la bande végétalisée (source : Braud et Latapie 2012, adaptée).....	336
Figure 198. Exemple de segmentation d'un tronçon du sous-secteur prioritaire n°1 en trois ensembles hydrologiques homogènes.....	338
Figure 199. Localisation des bras secondaire (A) et (E), site de La Charité-sur-Loire et (M), site de Mesves.....	339
Figure 200. Variation de la Hauteur d'eau en fonction des débits, exemple du bras secondaire (A), site de La Charité-sur-Loire.....	340
Figure 201. Calcul de la contrainte tractrice en utilisant le Paramètre de Shields et la classification de Ramette (selon Parker, 1982).....	343
Figure 202. Synthèse du protocole d'analyse pour optimiser les travaux de restauration, ce protocole peut être appliqué à l'échelle du fleuve.....	345
Figure 203. Perspective de restauration du site atelier de La Charité-sur-Loire.....	373
Figure 204. Perspective de restauration du site atelier de Mesves.....	376
Figure 205. Perspective de restauration du site atelier de Mesves.....	377

Liste des tableaux

Tableau 1. Echelles spatio-temporelles d'ajustement fluvial misent en relation avec les différentes actions anthropiques à l'échelle de la Loire.....	15
Tableau 2. Caractéristiques physiques, administratives et démographiques du bassin versant de la Loire.....	28
Tableau 3. L'endiguement du lit de la Loire depuis le Bec d'Allier à l'estuaire (d'après Babonaux, 1970).....	46
Tableau 4. Caractéristiques physique et hydrologique des sites d'étude.....	77
Tableau 5. Synthèse des interventions de restauration réalisées dans le site de la Charité-sur-Loire.	
Tableau 6. Liste des supports iconographique utilisés dans le cadre la thèse.....	86
Tableau 7. Attribution de codes aux différentes unités fluviales.....	102
Tableau 8. Récapitulatif des protocoles de mesures topographiques et bathymétriques.....	104
Tableau 9. Reconstitution de la base de données.....	119
Tableau 10. Récapitulatif des objectifs de l'étude du transport solide.....	121
Tableau 11. Récapitulatif des méthodes et outils de mesures et de traitement de données.....	148
Tableau 12. Rythme annuel des extractions de granulat dans les cours d'eau du bassin de la Loire (1981 – 1993).....	156
Tableau 153. Les secteurs retenus pour faire l'objet de travaux de restauration et d'entretien, site atelier de La Charité-sur-Loire (source : DDT 58).....	163
Tableau 14. Évolution verticale du profil en long des lignes d'eau entre 1978 et 1988.....	173
Tableau 15 Évolution verticale du profil en long des lignes d'eau entre 1978 et 2005.....	175
Tableau 16. Évolution verticale du profil en long des lignes d'eau entre 2003 et 2011.....	179
Tableau 18. Figure 6. Caractéristique de l'évolution des profils topographique transversaux réalisés dans le chenal principal au niveau de la partie amont (2008 -2011, transects 1 à 4).....	245
Tableau 19. Caractéristique de l'évolution des profils topographique transversaux réalisés dans le chenal principal au niveau de la partie médiane (2008 -2011, transects 5 à 8).....	248
Tableau 20. Caractéristique de l'évolution des profils topographique transversaux réalisés dans le chenal principal au niveau de la partie aval (2008 -2011, transects 9 à 13).....	251
Tableau 21. Caractéristique de l'évolution des profils topographique transversaux réalisés dans le chenal principal au niveau de la partie aval (2008 -2011, transects 14 à 17).....	252
Tableau 22. Synthèse de l'évolution topographique des profils transversaux (2005 – 2011), site atelier de La Charité-sur-Loire).....	254

Tableau 23. Détermination du débit d'entraînement des grains à partir du de Shields et la classification de Ramette.....	373
--	-----

Liste des photographies

Photographies 1. Élimination des encombres et des arbres penchés au niveau de la tête d'île située entre la chevette et le pont de Fonte (Source : DDT Saint Satur 2004).....	84
Photographies 2. Vue amont du pont de Fonte, des encombres accumulés au niveau des piles. L'objectif des travaux est la suppression de la végétation arborescente trop importante (Source : DDT Saint Satur 2004).....	85
Photographies 3. Vue aval du bras secondaire à restaurer sur l'île du Faubourg. Les actions menées sont : dévégétalisation et scarification sur 500 m, mouvements de matériaux et évacuation des végétaux arrachés. Objectif : favoriser l'écoulement dans le bras secondaire (Source : DDT Saint Satur 2004).....	86
Photographies 4. Site atelier de La Charité, travaux de dévégétalisation réalisés en 2010 sur la levée, suppression de la végétation arborée (source : Fouzi Nabet 2010).....	138
Photographies 5. Prélèvement d'un échantillon (site atelier de La Charité-sur-Loire).....	264
Photographies 1. Banc de galet apparu après l'évacuation de banc sable fins.....	264
Photographies 2. Déchaussement des racines de la végétation.....	266

